



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

# Offenlegungsschrift

⑯ DE 102 20 871 A 1

⑮ Int. Cl. 7:  
G 02 F 1/39

DE 102 20 871 A 1

⑯ Aktenzeichen: 102 20 871.9  
⑯ Anmeldetag: 10. 5. 2002  
⑯ Offenlegungstag: 20. 11. 2003

⑯ Anmelder:  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn,  
53113 Bonn, DE

⑯ Vertreter:  
Braun-Dullaeus Pannen Schrooten Haber, 40470  
Düsseldorf

⑯ Erfinder:  
Giessen, Harald, Prof. Dr., 67297 Marnheim, DE;  
Teipel, Jörn, 53129 Bonn, DE

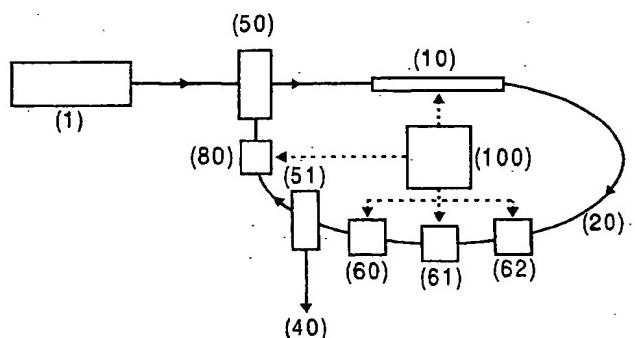
⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:  
DE 198 12 203 A1  
US200 2-00 48 078 A1  
US 55 74 818 A  
WO 01 86 347 A1

Technical Digest. Summaries of papers presented at  
the Conference on Lasers and Electro-Optics.  
Postconference Technical Digest. IEEE Cat.  
No.01CH37170), Washington, DC, USA, 2001, S.423-4-  
24;;

## Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑯ Optisch-Parametrischer Oszillator und Verstärker

⑯ Optisch-parametrischer Oszillator und/oder Verstärker,  
aufweisend ein nichtlineares optisches Element 10, in das  
im Betrieb Licht eines Lasers 1 als Pumpstrahl eingekop-  
pelt ist, wobei der Spektralbereich des Pumpstrahles sich  
beim Durchlaufen des Elementes 10 verändert, insbeson-  
dere verbreitert, wobei zumindest ein Teil des Lichtes,  
welches das Element 10 durchlaufen hat, aus dem Strahl  
ausgekoppelt und erneut in das Element 10 eingekoppelt  
ist, wobei das Element 10 einen optischen Wellenleiter  
aufweist, in dem zumindest auf einem Teilstück nichtli-  
neare optische Prozesse auftreten, und wobei das Teil-  
stück einen Durchmesser von weniger als 10 Mikrome-  
tern und eine Länge von weniger als 10 Metern aufweist.



DE 102 20 871 A 1

# DE 102 20 871 A 1

1

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen optisch-parametrischen Oszillatoren und/oder Verstärker aufweisend ein nichtlineares optisches Element, in das im Betrieb Licht eines Lasers als Pumpstrahl eingekoppelt ist, wobei der Spektralbereich des Pumpstrahles sich beim Durchlaufen des Elementes verändert, insbesondere verbreitert, und wobei zumindest ein Teil des Lichtes, welches das Element durchlaufen hat, aus dem Strahl ausgekoppelt und erneut in das Element eingekoppelt ist.

[0002] In solchen optisch-parametrischen Oszillatoren und Verstärkern (nachfolgend zusammenfassend Oszillatoren oder OPOs genannt) wird ankommende elektromagnetische Strahlung, beispielsweise Licht im ultravioletten, sichtbaren, und/oder infraroten Spektralbereich, mittels nichtlinearer Prozesse in Strahlung anderer Wellenlänge umgewandelt. Diese Pumpstrahlung wird dabei in einem oder mehreren nichtlinearen optischen Elementen in zwei Komponenten, die Signal- und die sogenannte Idlerstrahlung, umgewandelt. Solche OPOs sind in Lehrbüchern beschrieben. Als entscheidende Merkmale weisen sie den nichtlinearen Kristall auf, der das Pumplicht in Signal- und Idler umwandelt. Ein Teil der Strahlung oder die gesamte Strahlung wird in den nichtlinearen Kristall zurückführt, wo sie dann verstärkt wird (Rückkopplung).

[0003] Ein optisch-parametrischer Oszillator dieses einfachen Typs ist beispielsweise in DE 196 23 477 beschrieben. Entscheidendes Merkmal für die Funktionsfähigkeit dieses Typs ist die Phasenanpassung von Pump-, Signal- und Idlerstrahlung, die Impuls- und Energieerhaltung für die Strahlung fordert:  $\omega_{\text{pump}} = \omega_{\text{signal}} + \omega_{\text{idler}}$  und  $k_{\text{pump}} = k_{\text{signal}} + k_{\text{idler}}$ , dabei ist  $\omega$  die Frequenz der Strahlung und  $k$  der zugehörige Wellenvektor. Im Falle der Pumpstrahlung kann es sich um cw- oder gepulste Strahlung handeln. In letzter Zeit wurden große Anstrengungen unternommen, neue nichtlineare Kristalle zu entwickeln, die die Effizienz der Lichtumwandlung erhöhen. Dabei können sogenannte periodisch-gepolte Kristalle aufgrund der verbesserten Phasenanpassung diese Effizienz erhöhen.

[0004] Es ist zudem wünschenswert, eine Abstimm-Möglichkeit für die zu erzeugenden Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung zu haben. OPOs bieten dazu verschiedene Möglichkeiten wie zum Beispiel Kristallwinkel, Kristalltemperatur, Pumpwellenlänge, Polungsperiode von periodisch gepolten Kristallen. Solche Lösungsmöglichkeiten sind in EP 0 857 997 beschrieben. Für viele Anwendungen ist es vorteilhaft, einen weiten Abstimmbereich zu haben, der sich zum Beispiel über den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich und darüber hinaus ins Ultraviolette und ins Infrarote erstreckt. Dabei ist es mit Hilfe von ultrakurzen Pump-Pulsen in Kombination mit einem periodisch gepolten nichtlinearen Kristall mit einem von 50 : 50 abweichen den Polungszyklus möglich, effizient Wellenlängen im Sichtbaren zu erzeugen und diese abzustimmen. Die Herstellung derartiger Kristalle ist jedoch sehr schwierig und der Abstimmbereich erstreckt sich nicht über den kompletten Spektralbereich, zudem begrenzt die Phasenanpassungsfähigkeit der Kristalle die erreichte Bandbreite. Mehr als 150 nm Bandbreite lassen sich so nicht erzeugen, da bei dünnen Kristallen, die eine hohe Phasenanpassungsbandbreite besitzen, die Konversionseffizienz von Pumplicht zu Signallicht stark absinkt.

[0005] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen solchen optisch-parametrischen Oszillatoren und/oder Verstärker zu schaffen, der sich mit einfachen und kostengünstigen Mitteln umsetzen lässt und der Pulse mit hoher Bandbreite, weiter spektraler Durchstimmbarkeit und potentiell kurzer

2

Pulsdauer erzeugt, wobei die erreichbare Pulsdauer invers proportional zu ihrer spektralen Bandbreite ist.

[0006] Diese Aufgabe wird durch einen Oszillatator und/oder Verstärker mit den kennzeichnenden Merkmalen des

5 Anspruch 1 gelöst.

[0007] Der erfindungswesentliche Kerngedanke liegt darin, die bei den rückgekoppelten QPOs bislang benutzten Kristalle durch mehr oder minder lange Wellenleiter zu ersetzen. Diese Wellenleiter sind dabei so beschaffen, daß sie zumindest ein Teilstück aufweisen, in dem nichtlineare optische Prozesse auftreten oder als Ganzes derart beschaffen sind. Erfindungsgemäß zeichnen sich die Wellenleiter oder die entsprechenden Teilstücke dadurch aus, daß sie diese Eigenschaften schon auf einer Länge von weniger als 10 Metern gewährleisten, wobei der Durchmesser 10 Mikrometer nicht überschritten ist. Wegen besonders starker nichtlinearer Prozesse ist es dabei zu bevorzugen, wenn der Durchmesser weniger als 6 Mikrometer beträgt.

[0008] Zudem ist es besonders vorteilhaft, wenn sich der 20 Wellenleiter von einem zunächst großen Durchmesser zu dem Teilstück geringeren Durchmessers verjüngt. Ein solcher sich verjüngender Wellenleiter macht die Einkopplung des Lichtes in das nichtlineare enge Teilstück auf einfache Weise möglich und ist damit einfacher zu handhaben, als

25 eine Einkopplung, die beispielsweise durch eine fokussierende Optik erfolgt. Um eine besonders einfach handhbare Auskopplung des Lichtes zu gewährleisten, ist es vorteilhaft, wenn der Wellenleiter im Teilstück zu einer Taille verjüngt ist, sich also nach der Verjüngung wieder zu einem

30 größeren, insbesondere dem ursprünglichen Querschnitt erweitert. Dabei hat sich herausgestellt, daß eine Taillenlänge von mehr als einem Millimeter und von weniger als 300 Millimetern besonders vorteilhaft ist. Solche Fasern können bequem in entsprechenden Halterungen eingespannt werden, so daß eine große mechanische Stabilität gewährleistet ist.

[0009] Es gibt mehrere Möglichkeiten, den erfindungsgemäßen nichtlinearen Wellenleiter zu realisieren. Eine besonders einfache und daher zu bevorzugende Form ist die der

40 sogenannten "tapered fiber". Dazu wird eine bekannte Glasfaser lokal so lange erwärmt, bis sie sich an dieser Stelle strecken läßt. Beim Strecken verjüngt sie sich entsprechend, wobei auf einfache Weise Taillen eines Durchmessers von weniger als 6 Mikrometer bei großer Homogenität herstellbar sind. Solche Fasern sind dazu geeignet, ein Kontinuum von Licht, das vom UV über das Sichtbare bis ins Infrarote reicht, mittels gepulster Lichtenregung zu erzeugen. Die

45 Verfahren zur Erzeugung derartiger tapered fibers sind u. a. in WO 01/86347 A1 und US 5,960,146 beschrieben. Dabei ist die Funktionsfähigkeit keineswegs auf die dort beschriebenen Taillenlängen von mehr als 20 mm beschränkt. Es konnte nachgewiesen werden, daß auch kleinere Taillenlängen funktionieren. Ebenso sind sich verjüngende Fasern für

50 den erfindungsgemäßen Einsatz denkbar, die keine symmetrische Taillenform besitzen. In den genannten Veröffentlichungen wird lediglich Laserlicht in die Fasern hineingeschickt und modifiziertes Licht verlässt die Faser wieder. Der erfindungsgemäße Aspekt der Rückkopplung ist jedoch nicht genannt.

[0010] Zwar wurde schon vorgeschlagen, die nichtlineare Wechselwirkung, genauer gesagt das Vierwellenmischen in einer Faser, als nichtlineares Element in einem OPO anstelle eines Kristalls einzusetzen. Allerdings ist der Nachteil solch eines Aufbaus die relativ hohe Komplexität, die als Wellenlängenfilter ein Sagnac-Interferometer vorsieht. Die Ursache des Nachteils dieses Aufbaus ist die Tatsache, daß die

65 nichtlineare Wechselwirkung des Lichtes in einer Standardfaser relativ gering ist. Auch dispersionskompensierte Fa-

# DE 102 20 871 A 1

3

sern benötigen noch wesentlich mehr als 10 Meter Länge, um eine ausreichende Nichtlinearität zu erzeugen. Dabei liegt die Ausgangsleistung solcher Systeme im Bereich von weniger als 1 mW.

[0011] Der erfundungsgemäße nichtlineare Wellenleiter kann auch durch andere Arten von Fasern realisiert werden. Es bieten sich Fasern an, die eine das Licht leitende dünne Innenfaser aufweisen, die von im wesentlichen zum Erreichen einer mechanischen Festigkeit von Hohlfasern umgeben ist ("holey fiber"). Die Innenfaser hat dabei vorteilhafte Weise die oben beschriebenen Dimensionen. Als Wellenleiter können auch optische Fasern eingesetzt werden, die Bereiche mit einer Mikrostruktur aufweisen ("photonic crystal fiber").

[0012] Die wesentlichen Vorteile der Erfindung liegen darin, daß die Probleme mit der komplizierten und teuren Herstellung von speziellen nichtlinearen Kristallen, die auch noch in ihrer Phasenanpassungsbandbreite limitiert sind, umgangen werden und die Phasenanpassungsbedingung wegfallen. Zudem ist eine hohe Effizienz der Umwandlung und eine gute Durchstimmbarkeit der Wellenlängen von Signal- und Idler sowie eine große Verstärkungsbandbreite gegeben.

[0013] Mit der Erfindung ist es möglich, Weisslicht oder sogar Licht mit einer spektralen Bandbreite von UV über sichtbares Licht bis ins Infrarote zu verstärken und als Ausgangssignal des OPOs verfügbar zu machen. Dabei ist es von Vorteil, daß mit der Erfindung auch nur einen Teil der Wellenlängen oder nur schmalbandiges Licht erzeugt werden kann. Die Erfindung realisiert optisch-parametrische Oszillatoren als Wellenlängenkonverter, welche die oben genannten Vorteile aller verschiedenen Ansätze kombinieren. Insbesondere werden nichtlinearen Kristalle nicht mehr benötigt und die Wellenleiter besitzen im Gegensatz zu den Kristallen eine spektral sehr breite Phasenanpassung. Auf das Phasenanpassungskriterium kann eventuell ganz verzichtet werden, so daß die erfundungsgemäßen OPOs spektral weit abstimmbare sind. Sie sind temporal abstimmbare und können u. U. sehr kurze Pulse erzeugen. Die eingesetzten Wellenleiter besitzen eine hohe Nichtlinearität und somit einen großen Konversionseffizienz und eine hohe Verstärkung. Sie liefern eine im Vergleich zu bisher bekannten OPOs eine hohe Ausgangsleistung und zeichnen sich durch einen kompakten Aufbau aus. Dabei verursachen sie wesentlich geringere Kosten in der Herstellung als bisherige Systeme mit nichtlinearen Kristallen oder mit dispersionskompensierten Fasern.

[0014] Die gewerblichen Anwendungsmöglichkeiten eines solchen Systems sind wegen der genannten Eigenschaften vielfältig. Die günstigen Kosten, die Kompaktheit, die weite spektrale Durchstimmbarkeit, die hohe spektrale Bandbreite, die hohe Ausgangsleistung und die hohe Konversionseffizienz machen den Einsatz in optischen Telekommunikationssystemen, in Glasfasersystemen und -netzen, in der Spektroskopie, in der Pump-Abfrage-Untersuchung von festen, flüssigen oder gasförmigen Proben, in der Dermatologie, in der Augenbehandlung, in der Zahnbefindung, in Laserchirurgie-Anwendungen, in der Oberflächenanalytik, in der Interferometrie und in der Kohärenztomographie möglich. Das System läßt sich beispielsweise als Weisslichtquelle, als Supercontinuumsquelle, als Ultraviolettquelle, als Infrarotquelle, als durchstimmbare Laserquelle, als Lichtquelle für Laserprojektoren und als Lichtquelle für das Laserfernsehen einsetzen.

[0015] Ausführungsbeispiele der Erfindung sind im folgenden anhand der Fig. 1 bis 5 näher beschrieben. Es zeigen:

[0016] Fig. 1 ein Schema eines optisch-parametrischen

4

Oszillators (OPO),

[0017] Fig. 2 das Schema eines OPOs mit Spiegelsystem,  
[0018] Fig. 3 das Schema eines OPOs mit Spiegeln und Linsen,

[0019] Fig. 4 das Schema eines OPOs mit linearem Resonator und

[0020] Fig. 5 das Spektrum eines erfundungsgemäßen OPOs.

[0021] In Fig. 1 ist mit 1 ein gepulster Pumplaser bezeichnet, dessen emittierter Strahl in einen Einkoppler 50 zur Kombination zweier einlaufender Strahlen eingestrahlt wird. In einen zweiten Eingang des Einkopplers 50 wird ein zur Rückkopplung dienender Strahl eingestrahlt, der aus einem Synchronisationselement 80 herausgeführt ist. Die Rückkopplungsstrecke ist derart beschaffen, daß der kombinierte Strahl aus dem Einkoppler 50 in einen nichtlinearen Wellenleiter 10, in diesem Falle eine tapered fiber, eingekoppelt wird. Durch diesen Wellenleiter 10 im Spektrum modifiziert gelangt die Strahlung über eine als Wellenleiter ausgebildete Rückkopplungsstrecke 20 zu einem Auskoppler (51) zum Auskoppeln eines Teils 40 der Strahlung aus dem Strahlengang. Der nicht ausgekoppelte Rest wird dem Synchronisationselement 80 zugeführt, das mit einer Abstimmvorrichtung 100 kontrollierbar ist. Mit der Abstimmvorrichtung 100 ist auch die Eigenschaft des Wellenleiters 10 beeinflußbar, wobei auch die Wellenlänge, die Pulsdauer, die Intensität, die spektrale Bandbreite und/oder die Phase mittels der Abstimmvorrichtung durchstimmbar ist. Zur Erzeugung einer hohen Leistung wird das rückgekoppelte Licht mit dem Pumplicht zeitlich synchronisiert.

[0022] Der benutzte nichtlineare Wellenleiter, hier die sich verjüngende tapered fiber, erzeugt durch nichtlineare Prozesse in Wechselwirkung mit dem Licht andere Wellenlängenkomponenten. Diese werden unverändert oder modifiziert in die Faser zurückführt. Die Modifikation kann spektral, temporal oder durch Aufprägung eines bestimmten Phasenverhaltens erfolgen. Vorzugsweise sollte die Rückkopplung synchron mit den Pumppulsen erfolgen, aber Zeitverschiebungen zwischen Rückkopplungspuls und Pump-puls können ebenfalls gewünschte Effekte hervorrufen. Parallel und/oder seriell zu der ersten getaperten Faser können weitere getaperte Fasern in die Rückkopplungsstrecke eingefügt sein. Generell kann eine solche Vorrichtung zur Erzeugung von Strahlung eines bestimmten oder mehrerer Wellenlängenbereiche gleichzeitig eingesetzt sein. Die Pulse haben in diesen Beispielen eine Pulsdauer zwischen 100 Femtosekunden und 100 Pikosekunden. Die Pulsernergie kann zwischen 1 pJ und 10 nJ liegen. Der Abstand der einzelnen Pulse liegt typischerweise bei 12 ns. Wiederholungsraten zwischen einigen ps und 100 ns können auch vorteilhaft sein.

[0023] In die Rückkopplungsstrecke 20 ist ein Element zur spektralen Kontrolle, zur Beeinflussung und/oder Veränderung 62, ein Element zur Amplituden- und/oder Phasenkontrolle, -beeinflussung und/oder -veränderung 61, und/oder ein zeitlicher Pulsformer, -beeinflusser oder -veränderer 60, eingebracht, wobei diese Elemente mittels der Abstimmvorrichtung 100 durchstimmbar sind. Neben den erwähnten können noch weitere Elemente in die Rückkopplungsstrecke 20 eingebracht sein.

[0024] In der Ausführungsform nach Fig. 2 wird ein Pumplaser 1 über ein Element 50 zur Kombination zweier einlaufender Strahlen und einen Einkoppler 11 in die getaperte Faser 10 eingekoppelt. Das Licht wird dann mittels eines Auskopplers 12 aus der getaperten Faser ausgekoppelt und über einen Spiegel 21 und ein Element 51 zum Auskoppeln eines Teilstrahles und einen weiteren Spiegel 21 einem Synchronisationselement 80 und vermittels des Elementes 50

wieder in die Faser zurückgekoppelt.

[0025] In der Ausführungsform nach Fig. 3 wird der Pumplaser 1 durch einen Faraday-Isolator 30 und einen teil-durchlässigen Spiegel 22 zu Einkopplung durch eine Linse als Einkoppler 11 in die getaperte Faser 10 eingekoppelt und danach durch eine Linse als Auskoppler 12 und weitere Spiegeln 21 in die getaperte Faser 10 zurückgeführt. Einer der Spiegel ist entlang seiner Oberflächennormalen verschiebbar auf einem Verschiebetisch 81 montiert. Beim Durchlaufen eines teildurchlässigen Spiegels 24 wird ein Teil der Strahlung ausgekoppelt, wobei der ausgeteilte Strahl 40 als Nutzstrahl zur Verfügung steht. Der Nutzstrahl 40 kann als durchstimmbare Lichtquelle dienen. Die Abstimmung geschieht durch die Abstimmvorrichtung 100, vorzugsweise durch Verstimmen der Resonatorlänge am Verschiebetisch 81 und/oder durch einen teildurchlässigen Spiegel mit selektiver spektraler Charakteristik oder Filter 22. In der Rückkopplungsstrecke kann auch ein Interferometer mit Translationselement eingebaut sein.

[0026] In einer anderen Ausführungsform ist die Rückkopplung als linearer Resonator und nicht als Ringresonator ausgebildet, wobei der aus der getaperten Faser 10 ausgekoppelte Strahl durch ein Synchronisationselement 80 und einen Spiegel 21 in die getaperte Faser zurückgekoppelt wird (Fig. 4).

[0027] In Fig. 5 ist das Spektrum gezeigt, das mit einer erfundungsgemäßen Vorrichtung erzeugt wird, wenn die Pumppulse eine Wellenlänge von 800 nm und eine Widerholrate 75 fs von haben, wobei die rückgekoppelten Pulse zeitlich derart synchronisiert sind, daß eine Überlappung der Pulse herbeigeführt ist.

[0028] Die Ausgangsleistung der Pumpstrahlung beträgt vorzugsweise einige mW, kann aber auch über 10 mW betragen. Die Konversionseffizienz kann über 10% liegen. Die spektrale Breite erreicht leicht 200 nm und mehr, wobei eine Abstimmbarkeit von mehr als 100 nm möglich ist.

#### Patentansprüche

1. Optisch-parametrischer Oszillatior und/oder Verstärker aufweisend ein nichtlineares optisches Element (10), in das im Betrieb Licht eines Lasers (1) als Pumpstrahl eingekoppelt ist, wobei der Spektralbereich des Pumpstrahles sich beim Durchlaufen des Elementes (10) verändert, insbesondere verbreitert, und wobei zu mindest ein Teil des Lichtes, welches das Element (10) durchlaufen hat, aus dem Strahl ausgekoppelt und erneut in das Element (10) eingekoppelt ist, dadurch gekennzeichnet, daß das Element (10) einen optischen Wellenleiter aufweist, in dem zumindest auf einem Teilstück nichtlineare optische Prozesse auftreten, wobei das Teilstück einen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometern und eine Länge von weniger als 10 Metern aufweist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Wellenleiter (10) sich zu dem Teilstück geringeren Durchmessers verjüngt.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Wellenleiter (10) im Teilstück zu einer Taille verjüngt ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Wellenleiter (10) eine gestreckte Faser ("tapered fiber") ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Taille eine Länge von mehr als 1 Millimeter und von weniger als 300 Millimetern aufweist.
6. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, daß das Teilstück oder die Taille einen Durchmesser von weniger als 6 Mikrometern aufweist.

7. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Pumplaser (1) gepulst ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Wellenleiter (10) eine das Licht leitende Innenfaser aufweist, die von Hohlfasern umgeben ist ("holey fiber").

9. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Wellenleiter (10) Bereiche mit einer Mikrostruktur aufweist ("photonic crystal fiber").

10. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, gekennzeichnet durch folgende Elemente:

- Einen gepulsten Laser (1) als Pumpquelle
- Einen Einkoppler (50) zur Kombination zweier einlaufender Strahlen,
- Eine optische Faser (10) als nichtlinearer Wellenleiter,
- Eine Rückkopplungsstrecke (20),
- Einen Auskoppler (51) zum Abtrennen eines Teils (40) der Strahlung aus dem Strahlengang und
- Ein Synchronisationselement (100) zur Synchronisation von Pump Pulsen und rückgekoppelten Pulsen.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, gekennzeichnet durch ein Abstimmungselement zur Abstimmung der Wellenlänge, der Pulsdauer, der Intensität, der spektralen Bandbreite und/oder der Phase.

12. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Pulse des rückgekoppelten Lichtes mit den Pulsen des Pumplichtes zeitlich synchronisiert sind, wobei insbesondere eine Überlappung der Pulse herbeigeführt ist.

13. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß in die Rückkopplungsstrecke (20) mindestens eine weitere getaperte Faser eingefügt ist.

14. Verwendung einer Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche zur Erzeugung von Weisslicht, als Supercontinuumsquelle oder als durchstimmbare Laserquelle.

---

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

---

**- Leerseite -**

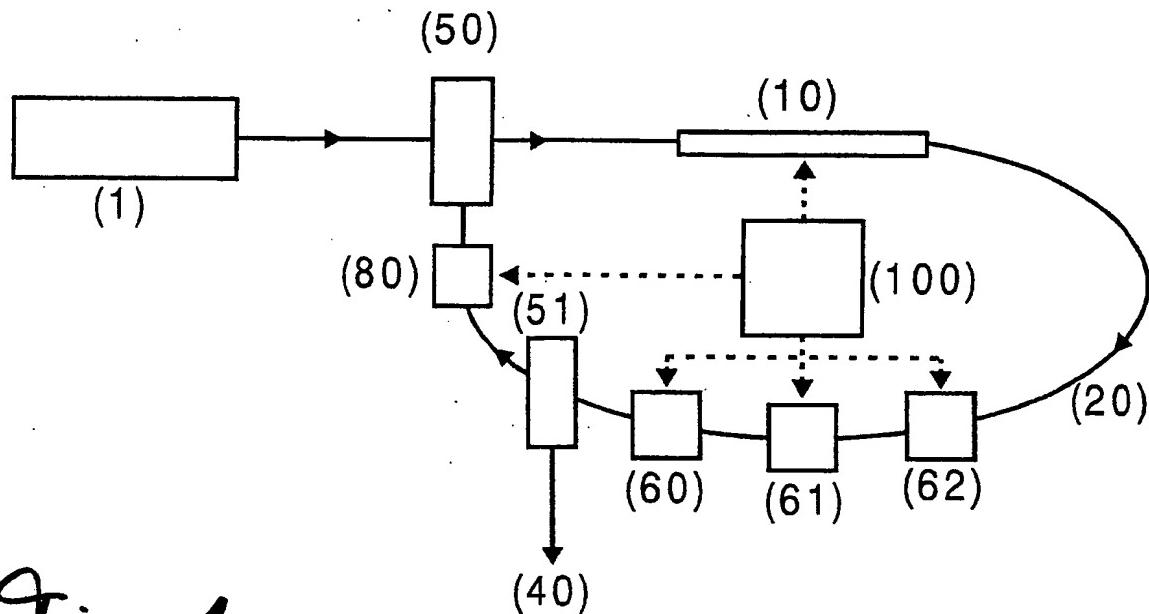


Fig. 1

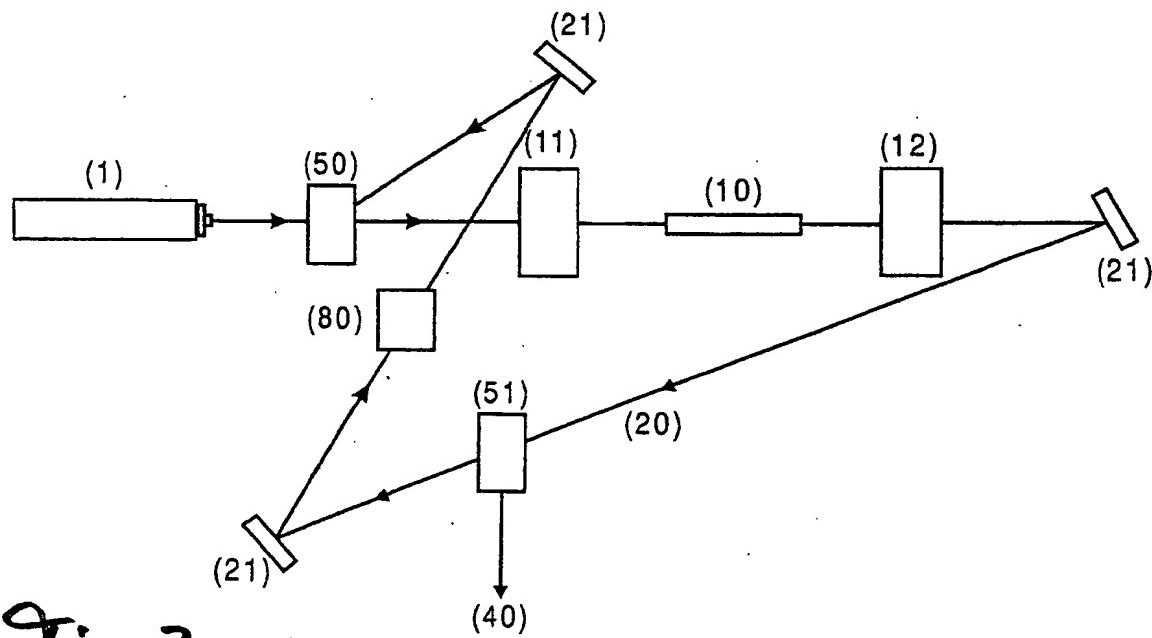


Fig. 2

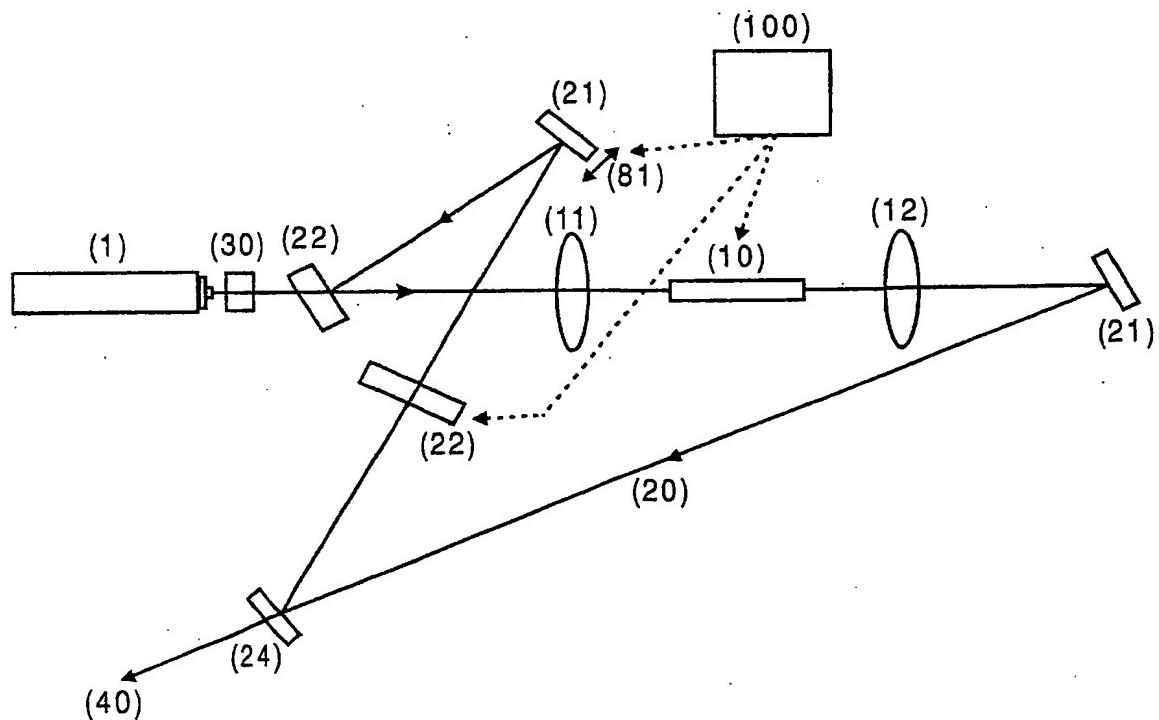


Fig. 3

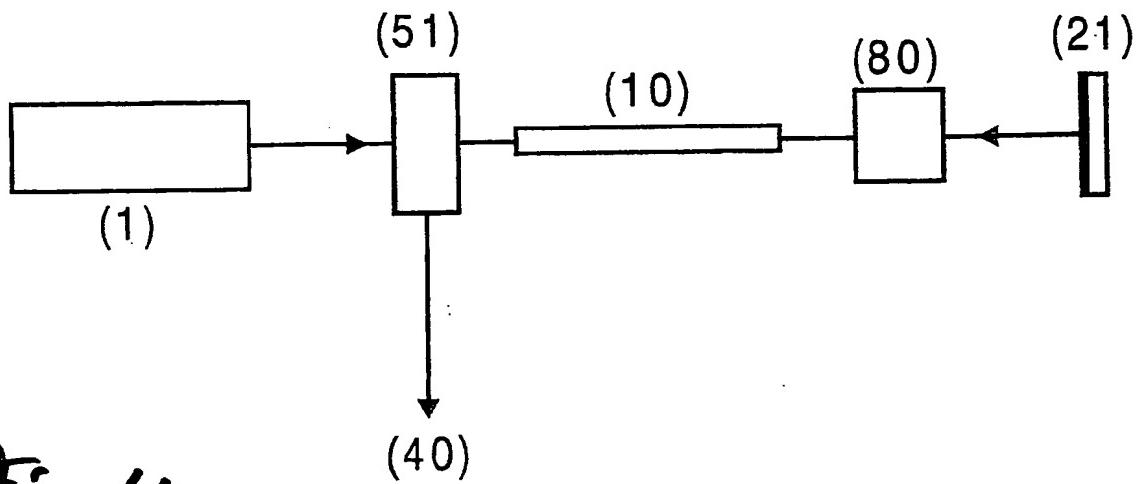


Fig. 4

ZEICHNUNGEN SEITE 3

Nummer:

DE 102 20 871 A1

Int. Cl. 7:

G 02 F 1/39

Offenlegungstag:

20. November 2003

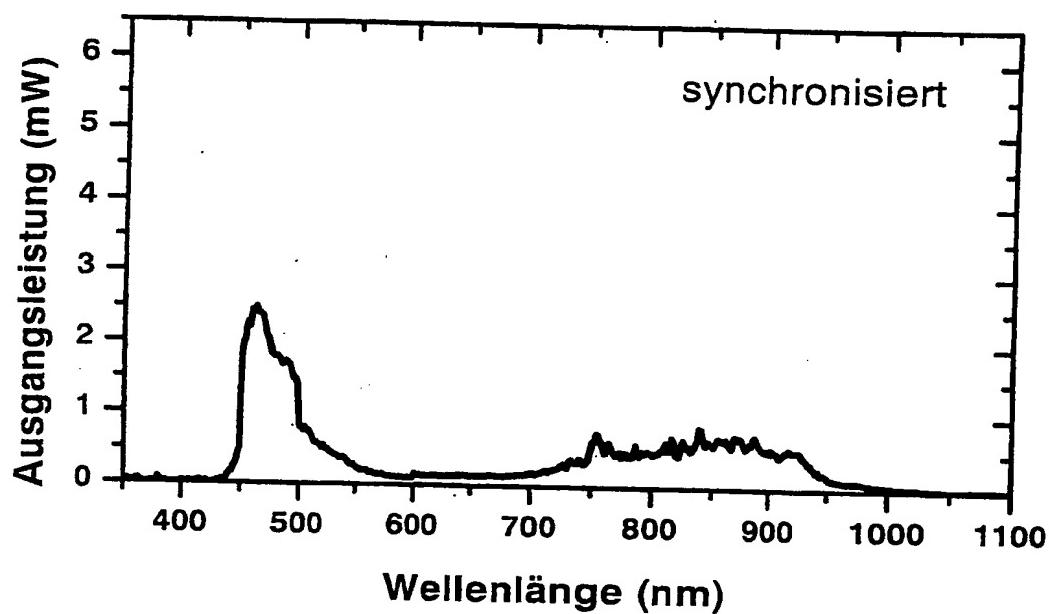


Fig. 5

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
20. November 2003 (20.11.2003)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 03/096490 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>:

H01S

(72) Erfinder; und

(21) Internationales Aktenzeichen:

PCT/DE03/01482

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): BRAUN, Bernd [DE/DE]; Löbstedter Strasse 9, 07749 Jena (DE). HOLLEMAN, Günter [DE/DE]; Wieselweg 15, 07749 Jena (DE).

(22) Internationales Anmelddatum:

7. Mai 2003 (07.05.2003)

(25) Einreichungssprache:

Deutsch

(74) Anwälte: BERTRAM, Helmut usw.; Oehmke & Kollegen, Neugasse 13, 07743 Jena (DE).

(26) Veröffentlichungssprache:

Deutsch

(81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE,

(30) Angaben zur Priorität:

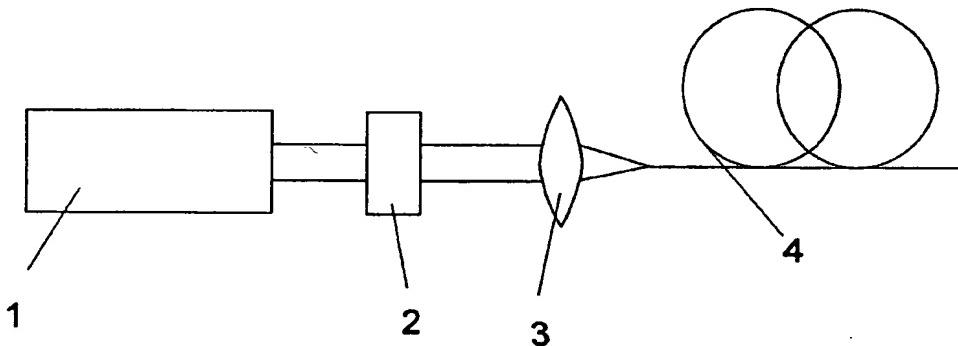
102 21 365.8 8. Mai 2002 (08.05.2002) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): JENOPIK LASER, OPTIK, SYSTEME GMBH [DE/DE]; Göschwitz Strasse 25, 07745 Jena (DE).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: OPTICAL ARRAY FOR GENERATING A BROADBAND SPECTRUM

(54) Bezeichnung: OPTISCHE ANORDNUNG ZUR ERZEUGUNG EINES BREITBANDSPEKTRUMS



(57) Abstract: Disclosed is an optical array for generating a broadband spectrum. The aim of the invention is to reduce the technical complexity of said optical array while keeping the source of laser radiation compact and adjusting in a simple manner the wavelength range of the broadband spectrum to the sensitivity range of conventional semiconductor detectors. Said aim is achieved by coupling in an optically adapted manner a passively mode-coupled solid body laser which supplies picosecond impulses having an initial wavelength that lies within the infrared range to a photonic fiber. A radiation performance interval of the broadband spectrum, which is maintained at an essentially steady intensity, is set within a wavelength range of 700 nm to 1000 nm below the initial wavelength by adjusting the dispersion of said photonic fiber to the initial wavelength. The broadband source of radiation is highly brilliant and can be used in white light interferometry (OCT, coherence radar, spectral radar) and in spectroscopy (pump-probe spectroscopy), among others.

A2  
WO 03/096490

(57) Zusammenfassung: Bei einer optischen Anordnung zur Erzeugung eines Breitbandspektrums besteht die Aufgabe, den dafür notwendigen Aufwand zu verringern, die Laserstrahlungsquelle kompakt zu halten und den Wellenlängenbereich des Breitbandspektrums auf einfache Weise dem Empfindlichkeitsbereich der marktüblichen Halbleiterdetektoren anzupassen. Ein passiv modengekoppelter Festkörperlaser zur Bereitstellung von Picosekunden-Impulsen mit einer im Infrarotbereich liegenden Ausgangswellenlänge ist optisch angepasst mit einer photonischen Faser gekoppelt, durch deren Dispersionsanpassung an die Ausgangswellenlänge ein im Wesentlichen mit gleichmäßiger Intensität verlaufendes Strahlungsleistungsintervall des Breitbandspektrums in einen Wellenlängenbereich von 700 nm - 1000 nm unterhalb der Ausgangswellenlänge gelegt ist. Die breitbandige Strahlungsquelle ist von hoher Brillanz und kann u.a. in der Weißlichtinterferometrie (OCT, Kohärenzradar, Spektralradar) und der Spektroskopie (Pump-Probe-Spektroskopie) eingesetzt werden.



SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,  
VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** ARIPO-Patent (GH,  
GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),  
eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,  
TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,  
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL,  
PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG,  
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu ver-  
öffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Ab-  
kürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Co-  
des and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der  
PCT-Gazette verwiesen.

Optische Anordnung zur Erzeugung eines Breitbandspektrums

- Die Erfindung betrifft eine optische Anordnung zur Erzeugung eines Breitbandspektrums, die als breitbandige Strahlungsquelle mit hoher Brillanz u.a. in der Weisslichtinterferometrie (OCT; Kohärenzradar, Spektral Radar) und der Spektroskopie (Pump-Probe-Spektroskopie) eingesetzt werden kann.
- Bei solchen Strahlungsquellen treten bekanntermaßen intensive Lichtimpulse durch ein nichtlineares optisches Medium hindurch, so dass es durch nichtlineare optische Prozesse zu einer erheblichen Spektrenverbreiterung kommt und ein sogenanntes Superkontinuum erzeugt wird.
- Von den verschiedenen bekannten Medien, in denen derartige Spektrenverbreiterungen vorkommen können, sind in letzter Zeit in zunehmendem Maße sogenannte photonische Fasern (PCF - photonic crystal fiber) zum Interesse für die Fachwelt geworden. Diese Fasern bestehen aus einem Quarzkern, der von einer Reihe mikroskopisch kleiner luft- bzw. gasgefüllter Hohlräume umschlossen ist, die entlang der Faserlänge verlaufen, so dass eine im Faserquerschnitt wabenförmige Faserstruktur entsteht. Durch die Größe und Anordnung der Lochstruktur kann die Strahlung auf ein sehr kleines Gebiet konzentriert werden, was zu den nichtlinearen optischen Prozessen führen kann.
- So konnte mehrfach nachgewiesen werden, dass PCFs ideale Medien zur Erzeugung eines Superkontinuums sind. Als vorwiegend unterstützende Prozesse wurden die stimulierte Raman-Streuung, die Selbst- und Kreuzphasenmodulation und die parametrische Vierwellenmischung erkannt. Aber auch

Solitoneneffekte, nichtlineare Effekte höherer Ordnung und Dispersion können eine Rolle spielen.

- Von besonderem Interesse war zunächst die  
5 Kontinuumerzeugung aus Femtosekunden-Laserimpulsen, die ausreichend hohe Feldintensitäten für die Aktivierung der nichtlinearen optischen Prozesse in den verwendeten Fasern besitzen. Untersuchungen wurden z. B. durchgeführt von  
10 Ranka, Windeler, Stentz, „Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm“, Opt. Lett. 25, 25 (2000),  
Härtl, Li, Chudoba, Ghanta, Ko, Fujimoto, „Ultrahigh-  
15 resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber“, Opt. Lett. 26, 608 (2001) und  
Holzwarth, Zimmermann, Udem, Hänsch et al., „White-light  
20 frequency comb generation with a diode-pumped Cr:LiSAF laser“, Opt. Lett. 26, 1376 (2001).  
In S. Coen, A. H. L. Chan, R. Leonhardt, J. D. Harvey, J.  
C. Knight, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell, "White-  
25 light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber", Optics Letters 26 1356 (2001) wurde gezeigt, dass ein beidseitig zur Wellenlänge der Pumpstrahlungsquelle (647 nm) aufgeweitetes Spektrum auch mit ps-Impulsen erzeugt werden kann.  
Alle bisher bekannten Lösungen zur Erzeugung eines  
30 Superkontinuums sind kompliziert im Aufbau und damit groß, wartungs- und kostenintensiv.

Das ist besonders von Nachteil, wenn, wie z. B. für die Weißlichtinterferometrie (OCT, Kohärenzradar, Spektralradar) und die Spektrometrie (Pump-Probe-Spektroskopie), eine kompakte breitbandige Strahlungsquelle mit hoher Brillanz gefordert wird.

Außerdem verlangt ein optimales Signal-Rausch-Verhältnis eine Spektralverteilung des Lichtes, die der spektralen Empfindlichkeit der marktüblichen Halbleiterdetektoren angepasst ist.

Aufgabe der Erfindung ist es deshalb, den Aufwand zur Erzeugung eines Breitbandspektrums zu verringern, indem die dafür notwendige Laserstrahlungsquelle kompakt zu halten und der Wellenlängenbereich des Breitbandspektrums auf einfache Weise dem Empfindlichkeitsbereich der marktüblichen Halbleiterdetektoren anzupassen ist.

Diese Aufgabe wird mit einer optischen Anordnung zur Erzeugung eines Breitbandspektrums gelöst, bei der ein passiv modengekoppelter Festkörperlaser zur Bereitstellung von Picosekunden-Impulsen mit einer im Infrarotbereich liegenden Ausgangswellenlänge optisch angepasst mit einer photonischen Faser gekoppelt ist, durch deren Dispersion anpassung an die Ausgangswellenlänge ein im Wesentlichen mit gleichmäßiger Intensität verlaufendes Strahlungsleistungsintervall des Breitbandspektrums in einen Wellenlängenbereich von 700 nm - 1000 nm unterhalb der Ausgangswellenlänge gelegt ist.

Obwohl auf eine komplizierte vorherige Frequenzkonversion verzichtet wird, kann das im Wesentlichen mit gleichmäßiger Intensität verlaufende Strahlungsleistungsintervall mit der vorliegenden

Erfindung in einen Bereich von 700 nm - 1000 nm gelegt werden.

Der verwendete Picosekunden-Festkörperlaser, der in seinem  
5 Aufbau an sich schon wesentlich einfacher und damit auch kostengünstiger ist als die im Stand der Technik für die Erzeugung eines Superkontinuums verwendeten Laser, zeichnet sich im Wesentlichen aber dadurch aus, dass als aktives Medium ein anisotroper Laserkristall dient, der von einem asymmetrischen Pumpstrahl gepumpt ist, dessen  
10 Pumpstrahlquerschnitt senkrecht zueinander unterschiedliche Ausdehnungen aufweist und der von einem an diese Asymmetrie angepassten Laserstrahlquerschnitt mit einem Achsverhältnis in senkrecht zueinander verlaufenden  
15 Richtungen größer 1 : 1 und kleiner 1 : 3 durchsetzt ist.

Von den kristallographischen Achsen des anisotropen Laserkristalls ist diejenige Achse, in deren Richtung der höchste Wert der Kristallbruchgrenze vorliegt, entlang des größten, in Richtung der geringeren Ausdehnung des  
20 Pumpstrahlquerschnitts gelegten Temperaturgradienten ausgerichtet.

Der anisotope Laserkristall, der einen von dem Pumpstrahl  
25 durchsetzten Kristallquerschnitt mit paarweise parallel gegenüberliegenden Kristallkanten von zumindest in einem Teilabschnitt des Laserkristalls unterschiedlicher Kantenlänge enthält, weist seinen größten Wärmeausbreitungskoeffizienten in Richtung der geringeren  
30 Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnitts und parallel zur Kristallkante mit der geringeren Kantenlänge auf.

Bei teilweiser Beibehaltung einer definierten Asymmetrie zum Erreichen einer hohen Pumpleistungsdichte wird der

Laserkristall zur Anpassung des Laserstrahls an diese Asymmetrie in völlig neuer Weise orientiert. Die durch die Reduzierung der Kristallabmessungen in Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnittes 5 hervorgerufene Asymmetrie des Wärmeflusses und die daraus resultierende Asymmetrie der thermischen Linse in senkrecht zueinander verlaufenden Richtungen kann derart an den Resonator angepasst werden, dass im Inneren des Kristalls ein asymmetrischer Lasermode realisiert wird, 10 der an den asymmetrischen Pumpmode angepasst ist, ohne dass weitere astigmatische Elemente im Resonator benötigt werden, d.h., ohne dass für die unterschiedlichen Achsen unterschiedliche Strahlformungsmittel eingesetzt werden müssen.

15 Es konnte außerdem gefunden werden, dass mit den Orientierungsmaßnahmen und der Ausbildung des Laserkristalls besonders günstige thermoelastische Eigenschaften in Form von verbesserten 20 Bruchfestigkeitseigenschaften verbunden sind, wodurch der Laserkristall zur Aufnahme hoher Pumpleistungsdichten angepasst werden kann. Außerdem sind wesentlich verbesserte Temperaturverhältnisse in der Kristallmitte des anisotropen Laserkristalls zu erreichen. Besonders die 25 Reduzierung der dortigen maximalen Temperatur wirkt sich infolge einer geringeren thermischen Belastung positiv auf eine Erhöhung der Effizienz des Laserüberganges aus.

Die asymmetrische thermische Linse wird dazu benutzt, den 30 elliptischen Laserstrahlquerschnitt mit dem Achsverhältnis größer 1 : 1 und kleiner 1 : 3 zu erzeugen. Mit Hilfe einer brewstergeschnittenen Strahlaustrittsfläche des Laserkristalls kann dieses Achsverhältnis noch um den Faktor des Verhältnisses des Brechungsindex des

Laserkristalls zum Brechnungsindex der Luft vergrößert werden.

Mit der Erfindung wird eine kostengünstige, kompakte und  
5 für viele Zwecke anwendbare Breitbandstrahlungsquelle bereitgestellt, die sich durch einen einfach aufgebauten und effizient arbeitenden Laser auszeichnet. Durch die Verwendung des speziell an die Ausgangswellenlänge angepassten Frequenzkonversionselementes kann eine  
10 signifikante Verbreiterung der Laserbandbreite mit einem im Wesentlichen mit gleichmäßiger Intensität verlaufenden Hauptanteil im Bereich zwischen 700 nm und 1000 nm erzielt werden, obwohl die Ausgangswellenlänge mit 1064 nm langwelliger ist.

15

Die Erfindung soll nachstehend anhand der schematischen Zeichnung näher erläutert werden. Es zeigen:

Fig. 1 eine optische Anordnung für eine kompakte  
20 Picosekunden-Breitbandstrahlungsquelle

Fig. 2 ein Supercontinuum-Spektrum der  
25 Picosekunden-Breitbandstrahlungsquelle  
gemäß Fig. 1

Fig. 3 eine Pumpanordnung für einen  
modengekoppelten Festkörperlaser

Fig. 4 die Achsenorientierung im anisotropen  
30 Laserkristall

Die Breitbandstrahlungsquelle gemäß Fig. 1 besteht aus einem passiv modengekoppelten Festkörperlaser 1, der einen, mit sättigbaren Halbleiterabsorbern arbeitenden

modengekoppelten Resonator mit drei Umlenkspiegeln und einem Endspiegel umfasst und von einem optischen Isolator 2 vor Rückkopplungen geschützt, über eine Einkoppeloptik 3 mit einem Frequenzkonversionselement in Form einer 5 photonischen Faser 4 gekoppelt ist.

Der Festkörperlaser 1, der eine durchschnittliche Ausgangsleistung von 6 W aufweist, liefert Laserpulse bei einer Ausgangswellenlänge im Infrarotbereich von  $\lambda = 10$  1064 nm und Pulsdauern von 8,5 ps, deren spektrale Bandbreite 0,27 nm beträgt. Das vorliegende Ausführungsbeispiel arbeitet weiterhin mit einer Pulswiederholrate von 120 MHz, einer mittleren Pulsennergie von 50 nJ und einer mittleren Pulsspitzenleistung von 5,8 15 kW. Die Ausgangsstrahlung ist horizontal linear polarisiert und die Strahlqualität beträgt  $M^2 = 1$ .

Der für die Ausgangswellenlänge spezifizierte optische Isolator 2 verhindert als optische Diode, dass 20 rückreflektierte oder -gestreute Strahlung aus der Einkoppeloptik 3 und der photonischen Faser 4 in den Resonator des Festkörperlasers 1 rückgekoppelt wird, was zu einer empfindlichen Störung des Modenkopplungsbetriebes führen würde.

25 Mit der Einkoppeloptik 3, für die eine asphärische Glas-Linse mit einer Brennweite von  $f = 4,5$  mm, einer numerischen Apertur von  $NA = 0,55$  und einer Antireflexbeschichtung verwendet wird, wird durch eine 30 Strahlfokussierung eine bestmögliche Anpassung der Freistrahlparameter (Strahlradius und Öffnungswinkel des Gaußschen Strahls,  $TEM_{00}$  des Festkörperlasers 1) an die Parameter der Fasermoden und somit eine maximale Leistungseinkopplung in die photonische Faser 4 erzielt

(maximale Einkoppeleffizienz 49,6 %). Auf diese Weise lässt sich die Anregung bestimmter Fasermoden mit niedriger Ordnung erreichen.

5 Die fünf Meter lange photonische Faser 4 mit einem Kerndurchmesser von 5 µm, einer numerische Apertur von NA = 0,21 ist dispersionsangepasst für die Ausgangswellenlänge und dient der spektralen Verbreiterung der spektralen Bandbreite der Laserpulse, wobei diese  
10 durch verschiedenste optisch nichtlineare Effekte mit unterschiedlich starker Ausprägung erreicht wird, z. B. durch stimulierte Ramanstreuung, Selbst- und Kreuzphasenmodulation, parametrische Vierwellenmischung, Solitoneneffekte und Dispersion sowie nichtlineare Effekte  
15 höherer Ordnung. Insbesondere ist die Faser 4 derart an die Ausgangswellenlänge angepasst, dass die monochromatische Infrarot-Laserstrahlung von 1064 nm in eine spektral breitbandige Strahlung auch im kürzerwelligen NIR-VIS-Bereich umgewandelt wird, also  
20 einen Bereich, in dem Halbleiterdetektorelemente ihren Empfindlichkeitsbereich besitzen.

Wie aus Fig. 2 zu entnehmen ist, wird mit der erfindungsgemäßen Anordnung ein Breitbandspektrum  
25 generiert, bei dem ein über 40 % der Strahlungsleistung umfassendes Strahlungsleistungsintervall in einen Bereich von 700 nm - 1000 nm gelegt ist. Von besonderer Bedeutung für die vorgesehenen Anwendungsbereiche ist der im Wesentlichen gleichmäßige Intensitätsverlauf in dem großen  
30 Wellenlängenbereich unterhalb der Ausgangswellenlänge, wogegen oberhalb ein Abfall der Leistung zu verzeichnen ist.

- Im Gegensatz zu den Lösungen des Standes der Technik weist die zur Bereitstellung dieses Spektrum dienende Breitbandstrahlungsquelle einen besonders einfachen und belastungsfähigen Aufbau auf, insbesondere was den 5 Festkörperlaser 1 anbetrifft. Dieser wird direkt von einem Diodenlaser gepumpt, wobei eine Pumpanordnung vorgesehen ist, die eine besonders hohe Pumpleistungsdichte zulässt, ohne den Laserkristall zu zerstören.
- 10 Die in Fig. 3 dargestellte Pumpanordnung enthält zum Endpumpen eines Laserkristalls 5 eine Pumpstrahlungsquelle 6 in Form eines Laserdiodenbarrens oder einer Anordnung davon, deren Pumpstrahl 7 mittels zweier Zylinderlinsen 8 und 9 fokussiert auf eine Strahleintrittsfläche 10 des 15 Laserkristalls 5 gerichtet ist. Der Pumpstrahl 7 weist beim Eintritt in den Laserkristall 5 eine Asymmetrie seines Querschnittes mit senkrecht zueinander unterschiedlichen Ausdehnungen auf.
- 20 Zum Erreichen einer hohen Pumpstrahldichte hat es sich zur Verbesserung der Strahleigenschaften des Laserdiodenbarrens vorteilhaft erwiesen, zusätzlich zur Kollimation der Fast-Axis auch die Slow-Axis in besonderer Weise zu kollimieren. Die in dem Laserdiodenbarren 25 zeilenförmig angeordneten Einzelementen beanspruchen üblicherweise nur einen Teil des zur Verfügung stehenden Platzes. Der andere Teil wird von Zwischenräumen, den sogenannten „spacings“ eingenommen, die das Strahlparameterprodukt verschlechtern, da sich die abstrahlende Fläche um den nicht ausgenutzten Platz des 30 Zwischenraumes vergrößert. Eine Anordnung von Kollimationslinsen in der Ebene der Überschneidung der Laserstrahlenbündel eliminiert das Todverhältnis, wodurch eine Verbesserung des Strahlparameterprodukts etwa um den

Faktor 2 erreicht werden kann. Die dafür vorgesehene Mikrooptik 11 ist der Pumpstrahlungsquelle 2 zu diesem Zweck nachgeordnet.

5 Der anisotrope Laserkristall 5, für den im vorliegenden Beispiel ein Nd:YVO<sub>4</sub>-Kristall von 4 x 2 x 6,9 mm<sup>3</sup> Größe verwendet wird, ist gemäß Fig. 4 derart zum Pumpstrahl orientiert, dass seine kristallographische c-Achse in Richtung der größeren Ausdehnung (parallel zur Slow-axis) 10 und die kristallographische a-Achse, in deren Richtung der höchste Wert der Kristallbruchgrenze und des Wärmeausbreitungskoeffizienten vorliegt, in Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnitts (parallel zur Fast-axis) gerichtet sind.

15 Wird zusätzlich die Kristallhöhe in Richtung der a-Achse erniedrigt und somit der Temperaturgradient weiter vergrößert, so hat sich gezeigt, dass damit eine erhebliche Erhöhung der Kristallfestigkeit gegenüber einer 20 thermischen Beanspruchung resultiert. Das bedeutet, dass der Laserkristall 5 bei wesentlich höheren Pumpleistungen und Pumpleistungsdichten betrieben werden kann.

Der Laserkristall 5 weist aus diesem Grund einen von dem 25 Pumpstrahl 7 durchsetzten Kristallquerschnitt mit paarweise parallel gegenüberliegenden Kristallkanten 12, 13, 14 und 15 von unterschiedlicher Kantenlänge auf, wobei die Kristallkanten 12 und 13 gegenüber den Kristallkanten 14 und 15 eine geringere Kantenlänge aufweisen und in 30 Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnitts verlaufen.

Das bevorzugte Kantenverhältnis liegt in einem brewstergeschnittenen Laserkristall selbstverständlich nur

in einem Teilabschnitt vor, der bei der Strahleintrittsfläche 10 beginnt und bei einer Ebene E endet, nach der die als Strahlaustrittsfläche dienende, gegen den Resonatorstrahl geneigte Brewsterfläche 16 die 5 Querschnittsfläche verringert und damit auch das Kantenverhältnis verändert.

Der mit Hilfe der asymmetrischen thermischen Linse und durch den Brewsterschnitt des Laserkristalls 1 erzeugte elliptische Modenquerschnitt des Laserstrahls weist so ein 10 Achsenverhältnis von 1 : 2 bis 1 : 3 auf.

## Patentansprüche

1. Optische Anordnung zur Erzeugung eines Breitbandspektrums, bei der ein passiv modengekoppelter Festkörperlaser zur Bereitstellung von Picosekunden-Impulsen mit einer im Infrarotbereich liegenden Ausgangswellenlänge optisch angepasst mit einer photonischen Faser gekoppelt ist, durch deren Dispersionsanpassung an die Ausgangswellenlänge ein im Wesentlichen mit gleichmäßiger Intensität verlaufendes Strahlungsleistungsintervall des Breitbandspektrums in einen Wellenlängenbereich von 700 nm - 1000 nm unterhalb der Ausgangswellenlänge gelegt ist.  
5
- 15 2. Optische Anordnung nach Anspruch 1, bei der der Festkörperlaser als aktives Medium einen anisotropen Laserkristall enthält, der von einem asymmetrischen Pumpstrahl gepumpt ist, dessen Pumpstrahlquerschnitt senkrecht zueinander unterschiedliche Ausdehnungen aufweist und der von einem an diese Asymmetrie angepassten Laserstrahlquerschnitt mit einem Achsverhältnis in senkrecht zueinander verlaufenden Richtungen größer 1 : 1 und kleiner 1 : 3 durchsetzt ist.  
20
- 25 3. Optische Anordnung nach Anspruch 2, bei der von den kristallographischen Achsen des anisotropen Laserkristalls diejenige Achse, in deren Richtung der höchste Wert der Kristallbruchgrenze vorliegt, entlang des größten, in Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnitts gelegten Temperaturgradienten ausgerichtet ist.  
30
- 35 4. Optische Anordnung nach Anspruch 3, bei der der anisotrope Laserkristall, der einen von dem Pumpstrahl durchsetzten Kristallquerschnitt mit paarweise parallel

gegenüberliegenden Kristallkanten von zumindest in einem Teilabschnitt des Laserkristalls unterschiedlicher Kantenlänge enthält, seinen größten Wärmeausbreitungskoeffizienten in Richtung der 5 geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnitts und parallel zur Kristallkante mit der geringeren Kantenlänge aufweist.

10 5. Optische Anordnung nach Anspruch 4, bei der in dem Laserkristall eine asymmetrische thermische Linse mit unterschiedlicher Stärke in senkrecht zueinander verlaufenden Richtungen ausgebildet ist, wobei die Stärke der thermischen Linse der Größe der Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnitts angepasst ist.

15 6. Optische Anordnung nach Anspruch 5, bei der das Achsverhältnis in dem Laserstrahlquerschnitt durch die richtungsabhängigen Unterschiede in den Stärken der thermischen Linse bestimmt ist.

1/2

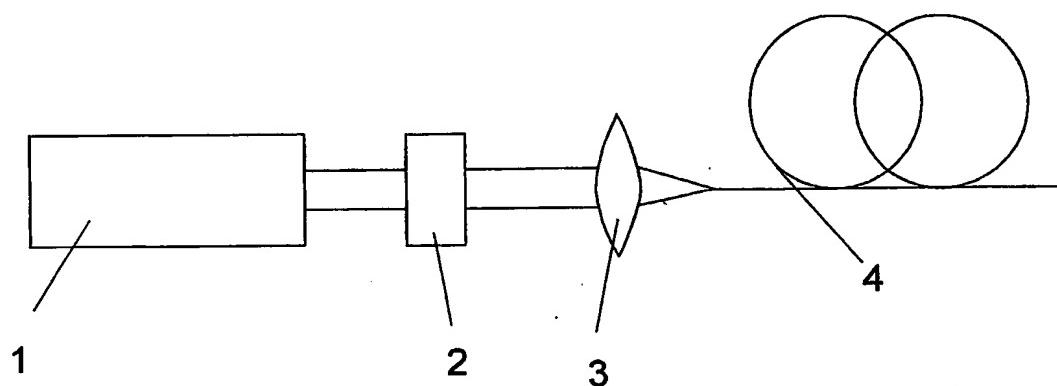


Fig. 1

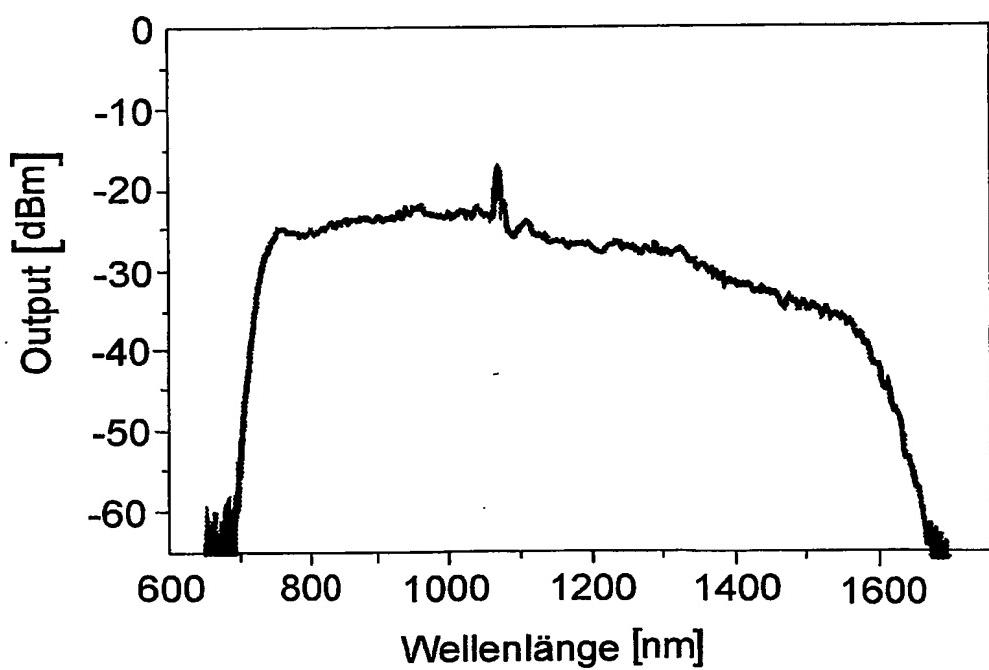


Fig. 2

2/2

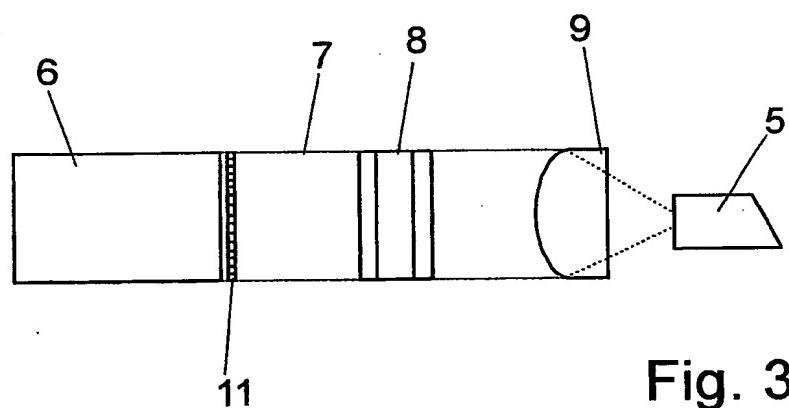


Fig. 3

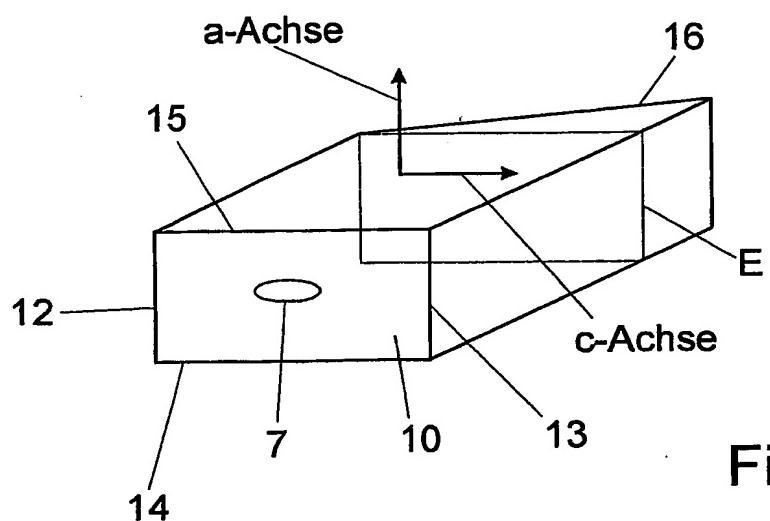


Fig. 4

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
20. November 2003 (20.11.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2003/096490 A3**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: H01S 3/0941,  
3/06

(72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): BRAUN, Bernd  
[DE/DE]; Löbstedter Strasse 9, 07749 Jena (DE).  
HOLLEMAN, Günter [DE/DE]; Wieselweg 15, 07749  
Jena (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2003/001482

(74) Anwälte: BERTRAM, Helmut usw.; Oehmke & Kollegen, Neugasse 13, 07743 Jena (DE).

(22) Internationales Anmelddatum:  
7. Mai 2003 (07.05.2003)

(81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT,  
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR,  
CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH,  
GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC,  
LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW,  
MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE,

(25) Einreichungssprache: Deutsch

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

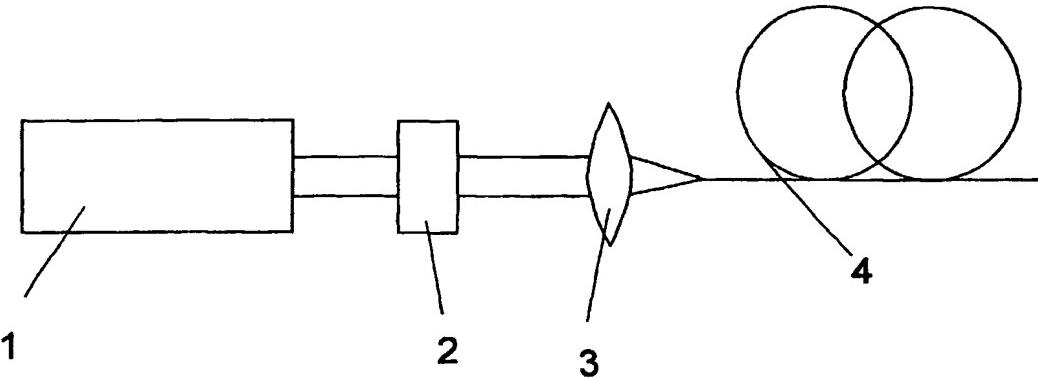
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
102 21 365.8 8. Mai 2002 (08.05.2002) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): JENOPTIK LASER, OPTIK, SYSTEME GMBH  
[DE/DE]; Göschwitzer Strasse 25, 07745 Jena (DE).

(54) Title: OPTICAL ARRAY FOR GENERATING A BROADBAND SPECTRUM

(54) Bezeichnung: OPTISCHE ANORDNUNG ZUR ERZEUGUNG EINES BREITBANDSPEKTRUMS



(57) Abstract: Disclosed is an optical array for generating a broadband spectrum. The aim of the invention is to reduce the technical complexity of said optical array while keeping the source of laser radiation (1) compact and adjusting in a simple manner the wavelength range of the broadband spectrum to the sensitivity range of conventional semiconductor detectors. Said aim is achieved by coupling in an optically adapted manner a passively mode-locked solid-state laser (1) which supplies picosecond pulses having an initial wavelength that lies within the infrared range to a photonic fiber (4). A radiation performance interval of the broadband spectrum, which is maintained at an essentially steady intensity, is set within a wavelength range of 700 nm to 1000 nm below the initial wavelength by adjusting the dispersion of said photonic fiber (4) to the initial wavelength. The broadband source of radiation is highly brilliant and can be used in white light interferometry (OCT, coherence radar, spectral radar) and in spectroscopy (pump-probe spectroscopy), among others.

(57) Zusammenfassung: Bei einer optischen Anordnung zur Erzeugung eines Breitbandspektrums besteht die Aufgabe, den dafür notwendigen Aufwand zu verringern, die Laserstrahlungsquelle (1) kompakt zu halten und den Wellenlängenbereich des Breitbandspektrums auf einfache Weise dem Empfindlichkeitsbereich der marktüblichen Halbleiterdetektoren anzupassen. Ein passiv modengekoppelter Festkörperlaser (1) zur Bereitstellung von Picosekunden-Impulsen mit einer im Infrarotbereich liegenden Ausgangswellenlänge ist optisch angepasst mit einer photonischen Faser (4) gekoppelt, durch deren Dispersionsanpassung an die Ausgangswellenlänge ein im Wesentlichen mit gleichmäßiger Intensität verlaufendes Strahlungsleistungsintervall des

WO 2003/096490 A3

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

# WO 2003/096490 A3



SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,  
VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht

— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

(88) **Veröffentlichungsdatum des internationalen Recherchenberichts:** 22. Januar 2004

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/DE 03/01482

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
IPC 7 H01S3/0941 H01S3/06

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

INSPEC, EPO-Internal, WPI Data, PAJ

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	COEN S ET AL: "Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers" JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA B (OPTICAL PHYSICS), APRIL 2002, OPT. SOC. AMERICA, USA, vol. 19, no. 4, pages 753-764, XP002255591 ISSN: 0740-3224 page 756, left-hand column, paragraph 2 -page 757, right-hand column, paragraph 2; figures 1-4 ---- -----	1,2
A	----- -----	3-6

Further documents are listed in the continuation of box C.

Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

10 November 2003

Date of mailing of the international search report

17/11/2003

Name and mailing address of the ISA  
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Riechel, S

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/DE 03/01482

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	KELLER U ET AL: "SEMICONDUCTOR SATURABLE ABSORBER MIRRORS(SESAM'S) FOR FEMTOSECOND TO NANOSECOND PULSE GENERATION IN SOLID-STATE LASERS" IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, IEEE SERVICE CENTER, US, vol. 2, no. 3, 1 September 1996 (1996-09-01), pages 435-451, XP000689812 ISSN: 1077-260X Seite 445, rechte Spalte, Zeilen 15 -26; Seite 447, rechte Spalte, Absatz 2 - Seite 448, rechte Spalte, Absatz 1; Tabelle 1 ---	1,2
Y	WEINGARTEN K J: "PASSIVELY MODE-LOCKED DIODE-PUMPED SOLID-STATE LASERS THAT USE AN ANTIRESONANT FABRY-PEROT SATURABLE ABSORBER" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 18, no. 8, 15 April 1993 (1993-04-15), pages 640-642, XP000364214 ISSN: 0146-9592 page 641, left-hand column; figure 2 ---	1,2
P,Y	SEEFELDT M ET AL: "Compact white-light source with an average output power of 2.4 W and 900 nm spectral bandwidth" OPTICS COMMUNICATIONS, NORTH-HOLLAND PUBLISHING CO. AMSTERDAM, NL, vol. 216, no. 1-3, 1 February 2003 (2003-02-01), pages 199-202, XP004404801 ISSN: 0030-4018 the whole document ---	1-6
P,Y	EP 1 306 940 A (JENOPTIK LASER OPTIK SYSTEME G) 2 May 2003 (2003-05-02) the whole document ---	1-6
A	DUDLEY J M ET AL: "Supercontinuum generation in air-silica microstructured fibers with nanosecond and femtosecond pulse pumping" JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA B (OPTICAL PHYSICS), APRIL 2002, OPT. SOC. AMERICA, USA, vol. 19, no. 4, pages 765-771, XP002255592 ISSN: 0740-3224 abstract ---	1 -/-

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No PCT/DE 03/01482
---

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	RANKA J K ET AL: "VISIBLE CONTINUUM GENERATION IN AIR-SILICA MICROSTRUCTURE OPTICAL FIBERS WITH ANOMALOUS DISPERSION AT 800 NM" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 25, no. 1, 1 January 2000 (2000-01-01), pages 25-27, XP000928530 ISSN: 0146-9592 cited in the application the whole document ----	1
A	US 5 825 551 A (NEILSON ANTHONY BRIAN ET AL) 20 October 1998 (1998-10-20) Spalte 2, Zeile 4 - Zeile 40; Spalte 8, Zeile 53 - Spalte 9, Zeile 5 ----	2
A	US 5 103 457 A (WALLACE RICHARD W ET AL) 7 April 1992 (1992-04-07) Spalte 3, Zeile 65 - Spalte 4, Zeile 27; Spalte 5, Zeile 37 - Spalte 6, Zeile 15; Abbildung 3 ----	2
A	US 5 561 547 A (KEIRSTEAD MARK S ET AL) 1 October 1996 (1996-10-01) abstract; figures 1,2A,3,4 -----	4

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Information on patent family members

International Application No PCT/DE 03/01482	
---	--

Patent document cited in search report	Publication date		Patent family member(s)	Publication date
EP 1306940	A 02-05-2003	DE CA CN EP JP US	10154007 A1 2390188 A1 1414669 A 1306940 A1 2003163394 A 2003091078 A1	15-05-2003 26-04-2003 30-04-2003 02-05-2003 06-06-2003 15-05-2003
US 5825551	A 20-10-1998	DE DE EP ES WO JP	69418725 D1 69418725 T2 0731932 A1 2131794 T3 9515510 A2 9506715 T	01-07-1999 30-09-1999 18-09-1996 01-08-1999 08-06-1995 30-06-1997
US 5103457	A 07-04-1992		NONE	
US 5561547	A 01-10-1996	DE DE EP JP JP WO	69501950 D1 69501950 T2 0742965 A1 3046844 B2 9507725 T 9521479 A1	07-05-1998 30-07-1998 20-11-1996 29-05-2000 05-08-1997 10-08-1995

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE 03/01482

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 IPK 7 H01S3/0941 H01S3/06

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
 IPK 7 H01S

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

INSPEC, EPO-Internal, WPI Data, PAJ

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	COEN S ET AL: "Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers" JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA B (OPTICAL PHYSICS), APRIL 2002, OPT. SOC. AMERICA, USA, Bd. 19, Nr. 4, Seiten 753-764, XP002255591 ISSN: 0740-3224	1,2
A	Seite 756, linke Spalte, Absatz 2 -Seite 757, rechte Spalte, Absatz 2; Abbildungen 1-4 ---- --/--	3-6

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besonders Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung,

eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"V" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erforderlicher Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erforderlicher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&amp;" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

10. November 2003

17/11/2003

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
 Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Riechel, S

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen  
PCT/DE 03/01482

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	<p>KELLER U ET AL: "SEMICONDUCTOR SATURABLE ABSORBER MIRRORS(SESAM'S) FOR FEMTOSECOND TO NANOSECOND PULSE GENERATION IN SOLID-STATE LASERS"            IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, IEEE SERVICE CENTER, US,            Bd. 2, Nr. 3,            1. September 1996 (1996-09-01), Seiten            435-451, XP000689812            ISSN: 1077-260X            Seite 445, rechte Spalte, Zeilen 15 -26;            Seite 447, rechte Spalte, Absatz 2 - Seite            448, rechte Spalte, Absatz 1;            Tabelle 1</p> <p>---</p> <p>WEINGARTEN K J: "PASSIVELY MODE-LOCKED DIODE-PUMPED SOLID-STATE LASERS THAT USE AN ANTIRESONANT FABRY-PEROT SATURABLE ABSORBER"            OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US,            Bd. 18, Nr. 8,            15. April 1993 (1993-04-15), Seiten            640-642, XP000364214            ISSN: 0146-9592            Seite 641, linke Spalte; Abbildung 2</p> <p>---</p> <p>SEEFELDT M ET AL: "Compact white-light source with an average output power of 2.4 W and 900 nm spectral bandwidth"            OPTICS COMMUNICATIONS, NORTH-HOLLAND PUBLISHING CO. AMSTERDAM, NL,            Bd. 216, Nr. 1-3,            1. Februar 2003 (2003-02-01), Seiten            199-202, XP004404801            ISSN: 0030-4018            das ganze Dokument</p> <p>---</p> <p>EP 1 306 940 A (JENOPTIK LASER OPTIK SYSTEME G) 2. Mai 2003 (2003-05-02)            das ganze Dokument</p> <p>---</p> <p>DUDLEY J M ET AL: "Supercontinuum generation in air-silica microstructured fibers with nanosecond and femtosecond pulse pumping"            JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA B (OPTICAL PHYSICS), APRIL 2002, OPT. SOC. AMERICA, USA,            Bd. 19, Nr. 4, Seiten 765-771,            XP002255592            ISSN: 0740-3224            Zusammenfassung</p> <p>---</p>	1,2
P,Y		1-6
P,Y		1-6
A		1
		-/-

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen  
PCT/DE 03/01482

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	RANKA J K ET AL: "VISIBLE CONTINUUM GENERATION IN AIR-SILICA MICROSTRUCTURE OPTICAL FIBERS WITH ANOMALOUS DISPERSION AT 800 NM" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, Bd. 25, Nr. 1, 1. Januar 2000 (2000-01-01), Seiten 25-27, XP000928530 ISSN: 0146-9592 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument ---	1
A	US 5 825 551 A (NEILSON ANTHONY BRIAN ET AL) 20. Oktober 1998 (1998-10-20) Spalte 2, Zeile 4 – Zeile 40; Spalte 8, Zeile 53 – Spalte 9, Zeile 5 ---	2
A	US 5 103 457 A (WALLACE RICHARD W ET AL) 7. April 1992 (1992-04-07) Spalte 3, Zeile 65 – Spalte 4, Zeile 27; Spalte 5, Zeile 37 – Spalte 6, Zeile 15; Abbildung 3 ---	2
A	US 5 561 547 A (KEIRSTEAD MARK S ET AL) 1. Oktober 1996 (1996-10-01) Zusammenfassung; Abbildungen 1,2A,3,4 -----	4

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen  
PCT/DE 03/01482

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
EP 1306940	A	02-05-2003	DE 10154007 A1 CA 2390188 A1 CN 1414669 A EP 1306940 A1 JP 2003163394 A US 2003091078 A1		15-05-2003 26-04-2003 30-04-2003 02-05-2003 06-06-2003 15-05-2003
US 5825551	A	20-10-1998	DE 69418725 D1 DE 69418725 T2 EP 0731932 A1 ES 2131794 T3 WO 9515510 A2 JP 9506715 T		01-07-1999 30-09-1999 18-09-1996 01-08-1999 08-06-1995 30-06-1997
US 5103457	A	07-04-1992	KEINE		
US 5561547	A	01-10-1996	DE 69501950 D1 DE 69501950 T2 EP 0742965 A1 JP 3046844 B2 JP 9507725 T WO 9521479 A1		07-05-1998 30-07-1998 20-11-1996 29-05-2000 05-08-1997 10-08-1995

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
15 November 2001 (15.11.2001)

PCT

(10) International Publication Number  
**WO 01/86347 A1**

(51) International Patent Classification<sup>7</sup>: G02F 1/365, 1/35      (74) Agents: BARDO, Julian, Eason et al.; Abel & Imray, 20 Red Lion Street, London WC1R 4PQ (GB).

(21) International Application Number: PCT/GB01/01947

(22) International Filing Date: 3 May 2001 (03.05.2001)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:  
0010950.4      5 May 2000 (05.05.2000) GB

(71) Applicant (for all designated States except US): THE UNIVERSITY OF BATH [GB/GB]; Claverton Down, Bath BA2 7AY (GB).

(72) Inventors; and

(75) Inventors/Applicants (for US only): BIRKS, Timothy [GB/GB]; 14 Horsecombe Brow, Combe Down, Bath BA2 5QY (GB). WADSWORTH, William, John [GB/GB]; 9 Edward Street, Lower Weston, Bath BA1 3BP (GB). RUSSELL, Philip, St. John [GB/GB]; Shepherds Mead, Southstoke, Bath BA2 7EB (GB).

(81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW.

(84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Published:

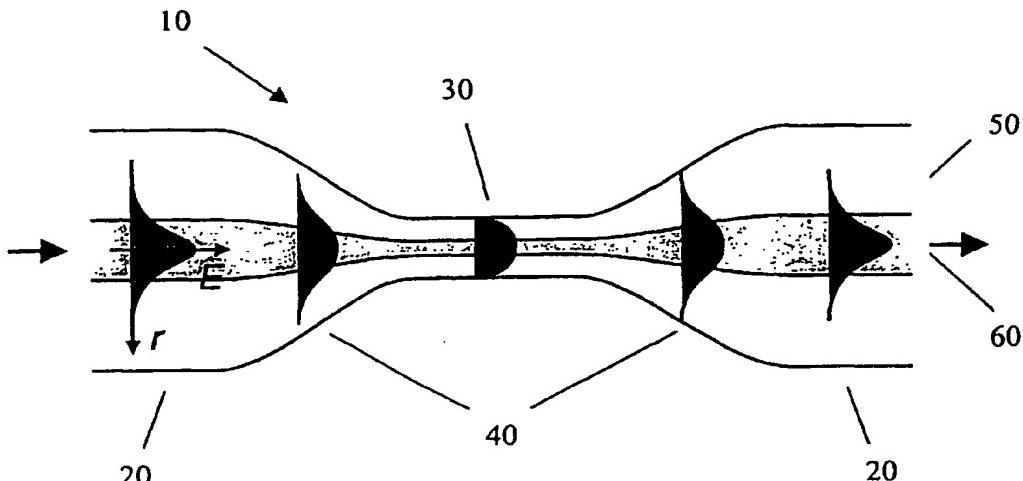
— with international search report

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: A NONLINEAR OPTICAL DEVICE



**WO 01/86347 A1**



(57) Abstract: A nonlinear optical device, comprises a source of input light having a first spectrum and an optical fibre 10 arranged so that in use the light propagates through the fibre 10, the optical fibre 10 comprises a tapered region including a waist 30, the waist 30 having a diameter smaller than 10 microns for a length of more than 20 mm, wherein the propagating light is converted by nonlinear optical processes into output light having a spectrum different from the first spectrum.

- 1 -

A nonlinear optical device

This invention relates to the field of nonlinear optical devices.

Conventional sources of broadband ("white") light such  
5 as an incandescent bulb are very weak, providing little power per unit solid angle per nanometer of bandwidth. More powerful sources generally have narrow bandwidths; for example, an erbium-doped fibre fluorescence source (such as an erbium amplifier without an input wave or a laser  
10 without mirrors) emits over a bandwidth only as wide as the emission spectrum of erbium (approximately 1480 nm to 1580 nm).

High-power broadband sources have applications in fields such as spectroscopy (particularly ultrafast pump-  
15 probe spectroscopy) and dispersion measurement.

Generation of high-power, broad-band light, known as "supercontinuum generation" (or "white-light continuum generation" or simply "continuum generation") has been demonstrated in optical fibres using high-power pump  
20 sources. Maxim S. Pshenichnikov et al. (Opt. Lett. 19, 572 (1994)) describe such a supercontinuum-generation device. In that device, an argon-ion mainframe laser is used to pump a self-modelocked Ti:sapphire laser. A cavity-dumping scheme is used to extract intracavity pulses of high  
25 energy. In Pshenichnikov's demonstration of supercontinuum-generation, 13 fs pulses of 40 nJ were injected into a 3-mm length of polarisation preserving fibre. Pulses having a bandwidth of between 500 nm and 1000 nm were produced.

30 Supercontinuum generation in a conventional step-index optical fibre such as that used by Pshenichnikov thus

- 2 -

requires high peak-power pulses. Recently, however, supercontinuum-generation has been demonstrated with much lower peak-power pulses by the use of a special form of fibre, the "microstructured", "holey" or "photonic crystal" 5 fibre (PCF). Such fibres comprise a plurality of longitudinal holes in a bulk fibre material, the holes being arranged to form a cladding region surrounding a core region. Waveguiding in such fibres is achievable by two methods. Firstly, if the "effective" refractive index of 10 the cladding region (that is, the refractive index resulting from the combined effects of the holes and the bulk material in the cladding region) is smaller than the refractive index of the core, then waveguiding can take place through total-internal reflection at the core-cladding boundary. Secondly, if the holes are arranged in 15 an appropriate periodic structure, the cladding can exhibit photonic band gaps and light of a wavelength within the bandgap can propagate only at the core, which acts as a defect in the periodic structure.

20 The demonstration of supercontinuum generation in a microstructured fibre is reported in Jinendra K. Ranka et al., Opt. Lett. 25, 25 (2000). Ranka uses 100-fs pulses with peak powers of only 8 kW (0.8 nJ energy) to generate an ultra-broadband continuum extending from 390 nm to 25 1600 nm from a 75-cm length of microstructured fibre.

However, the microstructured fibre is a complex device and it requires particular expertise and facilities for its design and fabrication. Furthermore, microstructured fibres are not at present generally commercially available.

30 A good guide to nonlinear optical effects in standard fibres is the textbook "Nonlinear Fiber Optics", 2<sup>nd</sup> Edn. Govind P. Agrawal, Academic Press, 1995.

- 3 -

An object of the invention is to provide a nonlinear optical device that overcomes problems such as those associated with prior art devices described above.

According to the invention there is provided a  
5 nonlinear optical device, comprising a source of input  
light having a first spectrum and an optical fibre arranged  
so that in use the light propagates through the fibre, the  
optical fibre comprising a tapered region including a  
waist, the waist having a diameter smaller than 10 µm for a  
10 length of more than 20 mm, wherein the propagating light is  
converted by nonlinear optical processes into output light  
having a spectrum different from the first spectrum.

Also according to the invention there is provided a  
method of generating nonlinear optical effects comprising  
15 propagating input light having a first spectrum through an  
optical fibre, the optical fibre having a tapered region  
including a waist, the waist having a diameter smaller than  
10 µm for a length of more than 20 mm, wherein the  
propagating light is converted by nonlinear optical  
20 processes into output light having a spectrum different  
from the first spectrum.

Also according to the invention there is provided an  
optical fibre comprising a tapered region including a  
waist, the waist having a diameter smaller than 10 µm for a  
25 length of more than 20 mm and, wherein, in use, the  
propagating light is converted by nonlinear optical  
processes into output light having a spectrum different  
from the first spectrum.

An advantage of the invention is that it enables  
30 nonlinear optical effects such as supercontinuum generation  
to be effected at low input powers in a device manufactured

- 4 -

from a standard fibre. Tapering fibres is a very well-known technique that requires only readily available equipment. Use of standard fibres results in direct compatibility with many existing fibre, and indeed free-space, systems.

Another advantage of the invention is that light may be input into a non-tapered portion of the fibre; that makes coupling of input light into the fibre much more straightforward than in the case of, for example, the microstructured fibre described above, in which it is necessary to introduce light into a core region of diameter approximately 1.7  $\mu\text{m}$ .

The changes to the first spectrum may be in amplitude and/or phase.

Preferably, the waist has a diameter smaller than the diameter at which the net group-velocity dispersion D experienced by input light at a wavelength of 850 nm is greater than  $-40 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ .

Group-velocity dispersion (GVD) is defined as parameter D, where

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{1}{v_g} \right),$$

where  $\lambda$  is the centre wavelength and  $v_g$  is the group velocity of the light at  $\lambda$ . The net GVD is taken to be the combined effect of the GVD resulting from propagation through the material of which the fibre is made and the GVD resulting from the shape of the tapered region.

Preferably, the waist has a diameter smaller than the diameter at which the net group-velocity dispersion D that would be experienced by light at a wavelength within

- 5 -

- ± 100 nm of the centre wavelength of the input light is anomalous. Dispersion is anomalous when D is positive. More preferably, the waist has a diameter smaller than the diameter at which the net group-velocity dispersion D  
5 experienced by light at the centre wavelength of the input light is anomalous.

The net group-velocity dispersion experienced by light propagating in the fibre depends on parameters such as the fibre material, the waist diameter and the wavelength of  
10 the light. A fibre that would be expected to exhibit normal dispersion at a particular wavelength can in some cases be made to exhibit anomalous dispersion at that wavelength by the provision of a waist of sufficiently small diameter (note, however, that a waists of very small  
15 diameter may not support a propagating mode). The possibility of providing anomalous dispersion is particularly important in pulsed systems because pulses propagating under dispersion generally broaden in time, weakening nonlinear effects. However, propagation under  
20 anomalous dispersion can lead to pulse shortening and thus enhance nonlinear effects such as supercontinuum generation.

- Preferably, the output spectrum has a width of at least 50 nm at 30 dB down from its maximum power.  
25 Advantageously, the output light has a still wider spectrum; thus, ever more preferable upper limits are 100 nm, 200 nm, 300 nm, 500 nm, 700 nm and 1000 nm at 30 dB, or preferably at 20 dB, or more preferably at 10 dB down from its maximum power.  
30 Preferably, the waist has a length of more than 30 mm. A longer waist will in general result in an enhanced

- 6 -

nonlinear effect. Thus ever more preferable lower limits are 50 mm, 80 mm and 150 mm.

The diameter of the waist may be less than 7  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 3.5  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 2.5  $\mu\text{m}$  or 2  $\mu\text{m}$ . Preferably, the waist is of 5 substantially uniform diameter over its length. Alternatively, the diameter of the waist may vary along its length; in that case, the diameters given above are maximum diameters within the waist region.

Preferably, the diameter of the waist does not exceed 10 twice its minimum value over its length. More preferably, the diameter of the waist does not exceed 1.5 times, 1.2 times, 1.1 times or 1.05 times its minimum value over its length.

Preferably, the power of the input light is greater 15 than 10 W. A higher input power will in general result in a stronger nonlinear effect. Thus ever more preferable lower limits are 30 W, 100 W, 300 W, 1 kW, 3 kW, 10 kW or 30 kW. Of course, undesirable thermo-mechanical damage may occur in some systems at very high powers, particularly for 20 continuous-wave input light.

Preferably, the input light is pulsed; in that case, the power referred to above is the peak power of the pulses. Preferably the pulses are shorter than 10 ps. Shorter pulse lengths will in general result in a stronger 25 nonlinear effect. Thus ever more preferable upper limits are 3 ps, 1 ps, 300 fs, 100 fs, 30 fs or 10 fs.

Preferably, the input light comes from a source of input light that is a laser. The laser may be a Ti:sapphire laser. The laser may be modelocked.

- 7 -

Preferably, the fibre is a standard fibre (that is, not a microstructured fibre). Alternatively, the fibre may be microstructured.

Preferably, the fibre comprises fused silica.

- 5 Preferably, the fibre is single mode at a wavelength within the spectrum of the output light. More preferably, the fibre is single mode at all wavelengths of the output light. Preferably, the fibre is single mode at the centre wavelength of the input light. More preferably, the fibre  
10 is single mode at all wavelengths of the input light.

The fibre may be fixed in a package at points along its length outside the tapered region. Such packaging is preferable in practice as it helps to prevent dust, which can cause catastrophic damage, from reaching the fibre.

- 15 The fibre may be surrounded, at least at the tapered region, by air. Alternatively, the fibre may be surrounded, at least at the tapered region, by a fluid other than air; that may be advantageous as a means to promote non-linear effects or to modify the dispersion  
20 characteristics of the taper. Alternatively, the fibre may be surrounded, at least at the tapered region, by a vacuum.

A second fibre may be fused to the fibre. Further fibres may be fused to the fibre and/or the second fibre.

- 25 The fused fibres may form a fused coupler. The fibres may be substantially identical so that the fused coupler is symmetric. Alternatively, at least one of the fibres may be dissimilar from at least one other fibre in the coupler so that the coupler is asymmetric. The dissimilar fibre may be so dissimilar that the coupler is a null coupler in  
30 which preferably less than 2% of the light is split over a wide wavelength range. An output of the coupler could be

- 8 -

used to monitor the coupler's behaviour in use. A null coupler in which specific higher order modes are excited in the fused waist may have different and advantageous optical properties.

5       A tapered region may be provided in the fibre by heating and stretching, by chemical etching, by polishing or by any other suitable means.

Also according to the invention there is provided a method of supercontinuum generation, comprising propagating 10 input light having a first spectrum through an optical fibre, the optical fibre having a tapered region including a waist, the waist having a diameter smaller than 10  $\mu\text{m}$ , wherein the propagating light is converted by nonlinear 15 optical processes into output light having an output spectrum having a width of at least 300  $\mu\text{m}$  at 30dB down from its maximum power.

An embodiment of the invention will now be described, by way of example only, with reference to the accompanying drawings, of which:

20       Fig. 1 is a schematic diagram of a tapered optical fibre according to the invention;

Fig. 2 shows the variation of net group-velocity dispersion (GVD) with waist diameter for the waist of a tapered silica fibre, at a wavelength of 850 nm;

25       Fig. 3 shows the variation of net group-velocity dispersion (GVD) with wavelength for a tapered silica fibre of waist diameter of 1  $\mu\text{m}$ , 1.5  $\mu\text{m}$  and 2.5  $\mu\text{m}$ , and also for bulk silica;

- 9 -

- Fig. 4 shows output spectra obtained from tapered  
(i) telecomms fibre designed for use at 1550 nm  
and (ii) 850 nm single-mode fibre; the broken  
line represents the input laser spectrum,  
5 scaled vertically for comparison;
- Fig. 5 shows output spectra obtained from tapered  
fibres of diameters (i) 2.5  $\mu\text{m}$  and (ii) 2  $\mu\text{m}$   
(iii) 1.8  $\mu\text{m}$  (iv) 1.5  $\mu\text{m}$  for pulse energies of  
5.7 nJ, 5.0 nJ, 4.1 nJ and 0.9 nJ respectively;
- 10 Fig. 6 shows output spectra obtained from the tapered  
fibre for different output powers: 380 mW, 210  
mW and 60 mW;
- Fig. 7 shows the visible, far-field pattern of light  
output from a tapered fibre;
- 15 Fig. 8 shows output spectra from (i) the non-  
pretapered output arm and (ii) the pretapered  
output arm of a null coupler for input light in  
the non-pretapered input arm.
- A conventional telecommunications optical fibre,  
20 having a cut-off wavelength of about 1250 nm and a  
numerical aperture of about 0.1, was heated and stretched  
in a flame, in a manner well known in the art, to produce  
tapered fibre 10. The fibre 10 (Fig. 1) includes non-  
tapered regions 20, waist 30, and transition regions 40. In  
25 cross-section, the fibre includes cladding 50 and core 60;  
the cladding 50 has a lower refractive index than the core  
60, so that light is guided in the core of the non-tapered  
regions 20 by total internal reflection. Fibre 10 is  
tapered to have a particularly long and narrow waist, being  
30 uniformly of diameter 1.8  $\mu\text{m}$  over a length of 90 mm.

- 10 -

Tapering does not introduce significant loss into the fibre.

In the waist 30, the core 60 is too small to guide light. Instead, light is guided in the waist 30 by total internal reflection at the boundary between cladding 50 and the surrounding air. Although silica has a small nonlinear susceptibility, the large refractive index step between fibre and air allows light to be confined to a very small area, increasing its intensity and promoting nonlinear effects such as self-phase modulation (SPM), four-wave mixing and Raman scattering. Such non-linear effects can result in a broadening of the spectrum of the propagating light, as is the case in supercontinuum generation.

The group-velocity dispersion (GVD) of silica is -84 ps nm<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup> at 850 nm and so silica displays "normal" dispersion at that wavelength; that is, light of longer wavelengths travels faster than light of shorter wavelengths. Pulses will generally broaden in the presence of SPM and normal GVD, leading to a weakening of nonlinear effects as the peak power of the pulse drops. However, as can be seen in Fig. 2, the net GVD resulting from propagation through the waist of a tapered silica fibre can become positive at sufficiently small waist diameters. The taper waist then displays anomalous dispersion; light of shorter wavelengths travels faster than light of longer wavelengths. The anomalously dispersive effects of propagation in the narrow waist then counter the normally dispersive effects. Pulses may thus not broaden; rather, they can narrow significantly due to nonlinear effects (with a corresponding broadening of the pulse's spectrum) and nonlinear effects can thus increase further as a pulse propagates.

- 11 -

In our experiment, the source of pulses was a Ti:sapphire laser tuned to 850 nm. The pulses were of durations between 200 fs and 500 fs. The spectrum of the input light was a comb of frequencies resulting from the 5 nature of the laser resonator.

For the 1.8  $\mu\text{m}$  waist 30, a GVD of +122 ps  $\text{nm}^{-1}$  and a nonlinear effective area of 1.21  $\mu\text{m}^2$  were calculated, corresponding to a nonlinear length of 0.6 mm and a dispersion length of 0.15 m. Significant SPM is therefore 10 expected despite silica's strong dispersion; indeed, in our particular experimental set-up, the taper's anomalous dispersion also helped to counteract normal dispersion suffered as pulses propagated through an isolator, a launch objective and a length of non-tapered fibre.

The variation with wavelength of GVD in the waist of a tapered fibre is shown in Fig. 3, with the curve for bulk silica given for comparison. The silica curve only becomes positive for wavelengths greater than about 1300 nm, but the tapered fibres can display anomalous GVD at much lower 15 wavelengths: for example, at about 650 nm for a 1.5  $\mu\text{m}$  waist.

Output spectra obtained under similar conditions were found not to vary significantly for different tapered fibres. The output spectra in Fig. 4, obtained from 20 1550 nm telecommms fibre (cut-off wavelength of 1250 nm) and 850 nm fibre (cut-off wavelength 740 nm), are similar. The fibres had waist diameters of 1.8  $\mu\text{m}$  and taper lengths of 90 mm and the average power was 310 mW and pulse energy 25 4.1 nJ (the powers and energies of the output pulses were measured, but the fibre exhibited little loss and it is 30

- 12 -

believed that the powers and energies of the input pulses were very similar).

Fig. 5 shows output spectra for different waist diameters. Fig. 5 (i) is for a waist of 2.5  $\mu\text{m}$ , with a 5 pulse energy of 5.7 nJ, corresponding to 430 mW average power. A broad supercontinuum extends from about 500 nm to about 1400 nm. Although not shown in the figures, the output spectrum is expected to retain the comb-like frequency structure of the input light. Fig. 5(ii) shows a 10 similar, slightly broader spectrum for a waist of 2  $\mu\text{m}$ , with 5.0 nJ, 380 mW pulses; the spectrum extends from about 400 nm to about 1500 nm. Still broader, but less-flat, continua are obtained with waists of (Fig. 5(iii)) 1.8  $\mu\text{m}$  (4.1 nJ pulses) and (Fig. 5(iv)) 1.5  $\mu\text{m}$  (0.9 nJ pulses).

15 In Fig. 6, the curves have been shifted vertically for visibility; the peak powers of the three curves other than the input curve were roughly similar. The bandwidth of the generated continuum increases with increasing pulse power.

Intense visible and ultraviolet output was observed.  
20 Although the fibre, in its tapered and its non-tapered regions was multimode at those wavelengths, the output was in a single mode (Fig. 7).

There was no spectral broadening in non-tapered fibres.

25 The fibre's diameter could be varied along its length as it is tapered, enabling control of the distribution of intensity and dispersion along the device. That facility could be used, for example, to optimise the design of the device, for example in order to make the output spectrum 30 flatter or broader.

- 13 -

Fibre 10 was mounted in a simple dust-proof housing and proved to be robust, surviving for several days without degradation and the fibre 10 also withstood impacts resulting from its being dropped from a height of about one 5 meter. Fibre 10 is readily compatible with conventional fibre and free-space systems: core 60 is 9  $\mu\text{m}$  across in the non-tapered region 20 and it is thus relatively easy to launch input light into the fibre.

Important immediate applications for this source of 10 intense white light include spectroscopy with fine spatial resolution, ultrafast spectroscopy (pump-probe), frequency metrology, pulse compression and the measurement of dispersion.

A null fibre coupler has also been demonstrated using 15 a fibre according to the invention. A null coupler is made by pre-tapering one fibre and fusing it to and tapering it with a non-pretapered fibre. Fig. 8 shows output spectra obtained from (i) the non-pretapered output arm and (ii) the pretapered output arm. The splitting ratio was 1.3 %, 20 the waist diameter was 2  $\mu\text{m}$  and the length of the tapered region was 85 mm. 290 mW (3.8 nJ) was launched into the non-pretapered input arm. The tap arm (pretapered arm) spectrum is a good representation of the main arm spectrum.

It will be appreciated that various modifications and 25 variations can be made to the designs described above.

Claims:

1. A nonlinear optical device, comprising a source of input light having a first spectrum and an optical fibre arranged so that in use the light propagates through the fibre, the optical fibre comprising a tapered region including a waist, the waist having a diameter smaller than 10  $\mu\text{m}$  for a length of more than 20 mm, wherein the propagating light is converted by nonlinear optical processes into output light having a spectrum different from the first spectrum.
2. A nonlinear optical device as claimed in claim 1, the waist having a diameter smaller than the diameter at which the net group-velocity dispersion D experienced by the input light is greater than  $-40 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ .
3. A nonlinear optical device as claimed in claim 1 or claim 2, the waist having a diameter smaller than the diameter at which the net group-velocity dispersion D that would be experienced by light at a wavelength within  $\pm 100 \text{ nm}$  of the centre wavelength of the input light is anomalous.
4. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, the waist having a diameter smaller than the diameter at which the net group-velocity dispersion D experienced by the input light is anomalous.
5. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the output spectrum has a width of at least 50 nm at 30 dB down from its maximum power.
6. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the waist has a length of more than 50 mm.

- 15 -

7. A nonlinear optical device as claimed in claim 6, in which the diameter of the waist is less than 7 µm.
8. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the waist is of substantially uniform  
5 diameter over its length.
9. A nonlinear optical device as claimed in any of claims 1 to 7, in which the diameter of the waist varies along its length.
10. A nonlinear optical device as claimed in claim 9, in  
10 which the diameter of waist does not exceed twice its minimum value over its length.
11. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the power of the input light is greater than 10 W.
- 15 12. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the input light is pulsed.
13. A nonlinear optical device as claimed in claim 12, in which the pulses are shorter than 10 ps.
14. A nonlinear optical device as claimed in any preceding  
20 claim, in which a source of input light is a laser.
15. A nonlinear optical device as claimed in claim 14, in which the laser is a Ti:sapphire laser.
16. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the fibre is a standard fibre.
- 25 17. A nonlinear optical device as claimed in any of claims 1 to 15, in which the fibre is microstructured.
18. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the fibre comprises fused silica.

- 16 -

19. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the fibre is single mode at a wavelength within the spectrum of the output light.
20. A nonlinear optical device as claimed in claim 19, in  
5 which the fibre is single mode at all wavelengths of the output light.
21. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the fibre is single mode at the centre wavelength of the input light.
- 10 22. A nonlinear optical device as claimed in claim 21, in which the fibre is single mode at all wavelengths of the input light.
23. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the fibre is surrounded, at least at the  
15 tapered region, by air.
24. A nonlinear optical device as claimed in any of claims 1 to 23, in which the fibre is surrounded, at least at the tapered region, by a fluid other than air.
25. A nonlinear optical device as claimed in any of claims  
20 1 to 23, in which the fibre is surrounded, at least at the tapered region, by a vacuum.
26. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which the fibre is surrounded, at least at the tapered region, with a fluid other than air.
- 25 27. A nonlinear optical device as claimed in any preceding claim, in which a second fibre is fused to the fibre.
28. A nonlinear optical device as claimed in claim 27, in which further fibres are fused to the fibre and/or the second fibre.

- 17 -

29. A nonlinear optical device as claimed in claim 27 or  
claim 28, in which the fused fibres form a fused coupler.
30. A nonlinear optical device as claimed in claim 29, in  
which the fibres are substantially identical so that the  
5 fused coupler is symmetric.
31. A nonlinear optical device as claimed in claim 29, in  
which at least one of the fibres is dissimilar from at  
least one other fibre in the coupler so that the coupler is  
asymmetric.
- 10 32. A nonlinear optical device as claimed in claim 31, in  
which the dissimilar fibre is so dissimilar that the  
coupler is a null coupler.
33. A nonlinear optical device as claimed in any of claims  
27 to 32, in which an output of the coupler is used to  
15 monitor the coupler's behaviour in use.
34. A method of generating nonlinear optical effects  
comprising propagating input light having a first spectrum  
through an optical fibre, the optical fibre having a  
tapered region including a waist, the waist having a  
20 diameter smaller than 10 µm for a length of more than  
20 mm, wherein the propagating light is converted by  
nonlinear optical processes into output light having a  
spectrum different from the first spectrum.
35. An optical fibre comprising a tapered region including  
25 a waist, the waist having a diameter smaller than 10 µm for  
a length of more than 20 mm, wherein, in use, the  
propagating light is converted by nonlinear optical  
processes into output light having a spectrum different  
from the first spectrum.

- 18 -

36. A method of supercontinuum generation, comprising propagating input light having a first spectrum through an optical fibre, the optical fibre having a tapered region including a waist, the waist having a diameter smaller than  
5 10  $\mu\text{m}$ , wherein the propagating light is converted by nonlinear optical processes into output light having an output spectrum having a width of at least 300  $\mu\text{m}$  at 30dB down from its maximum power.
37. A method of generating nonlinear optical effects  
10 substantially as herein described with reference to and as illustrated by the accompanying drawings.
38. A nonlinear optical device substantially as herein described with reference to and as illustrated by the accompanying drawings.

1/4

Fig. 1

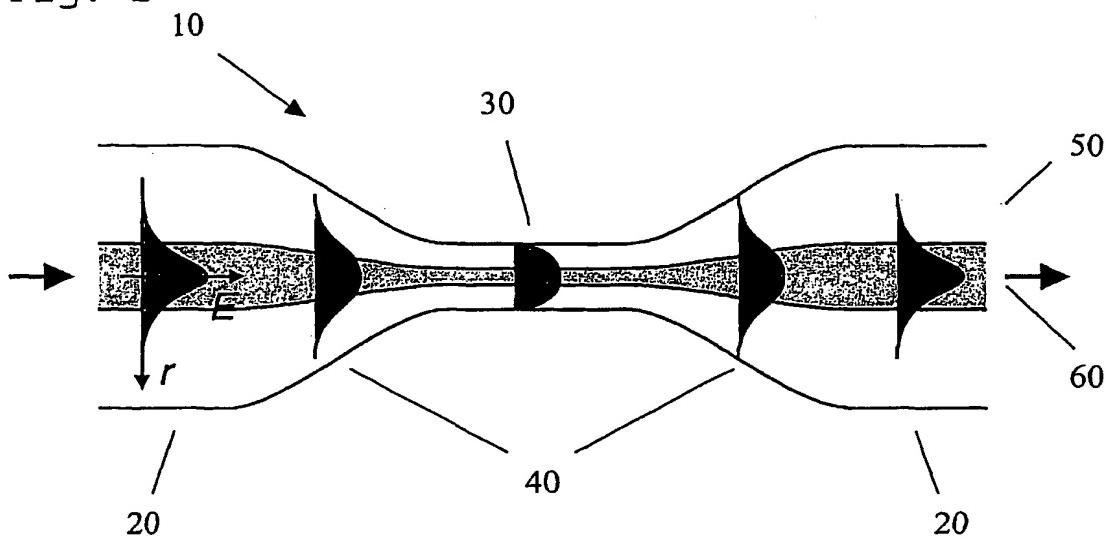


Fig. 2

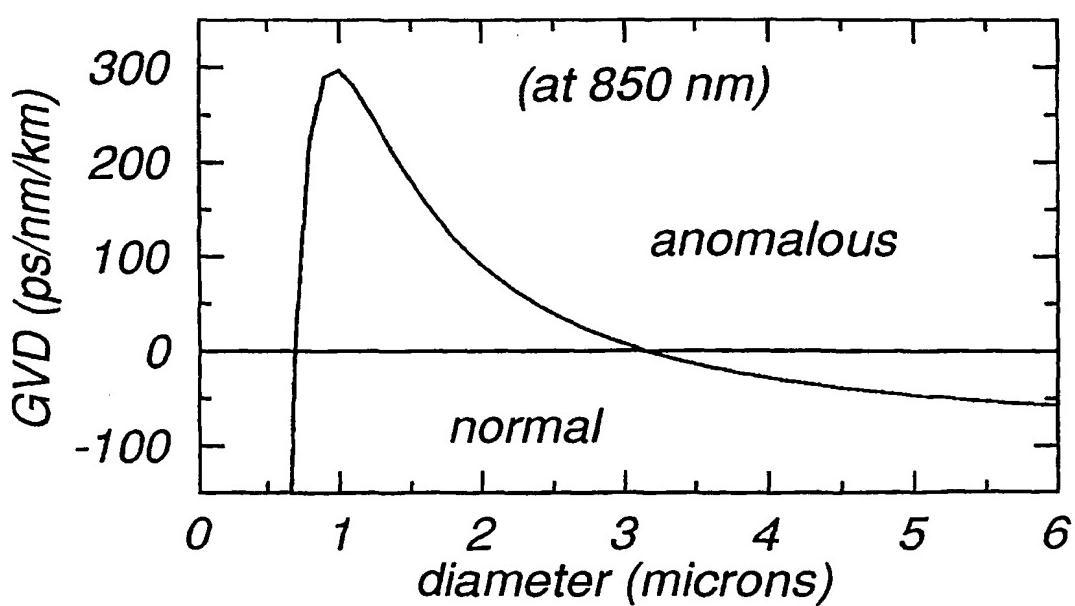


Fig. 3

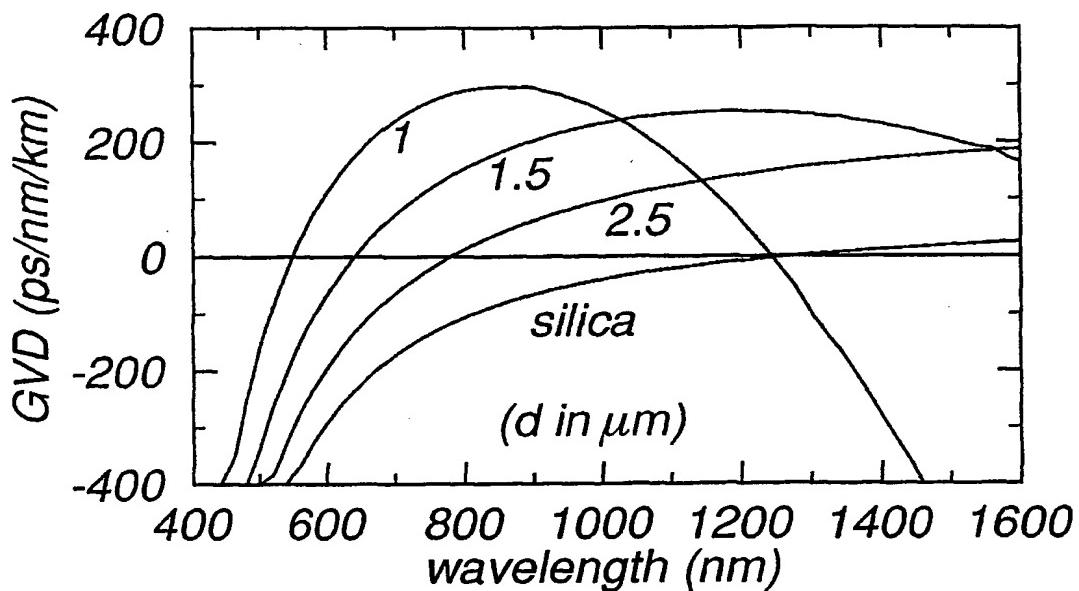


Fig. 4

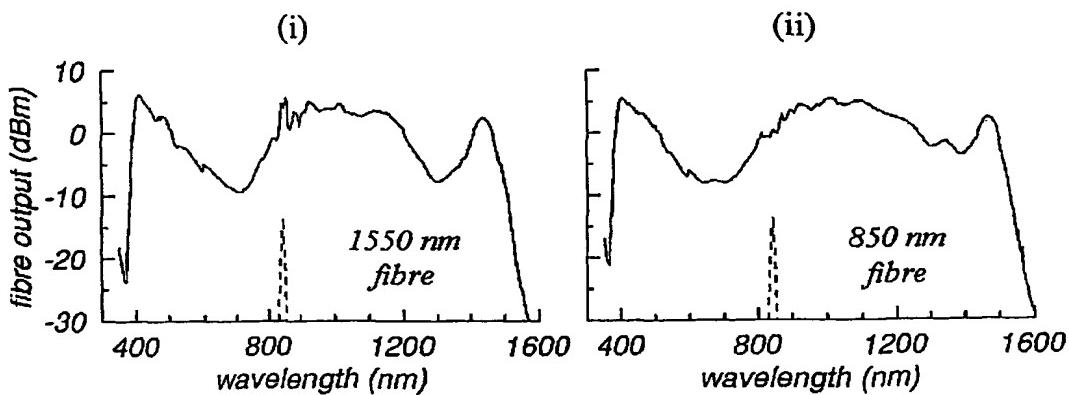


Fig. 5

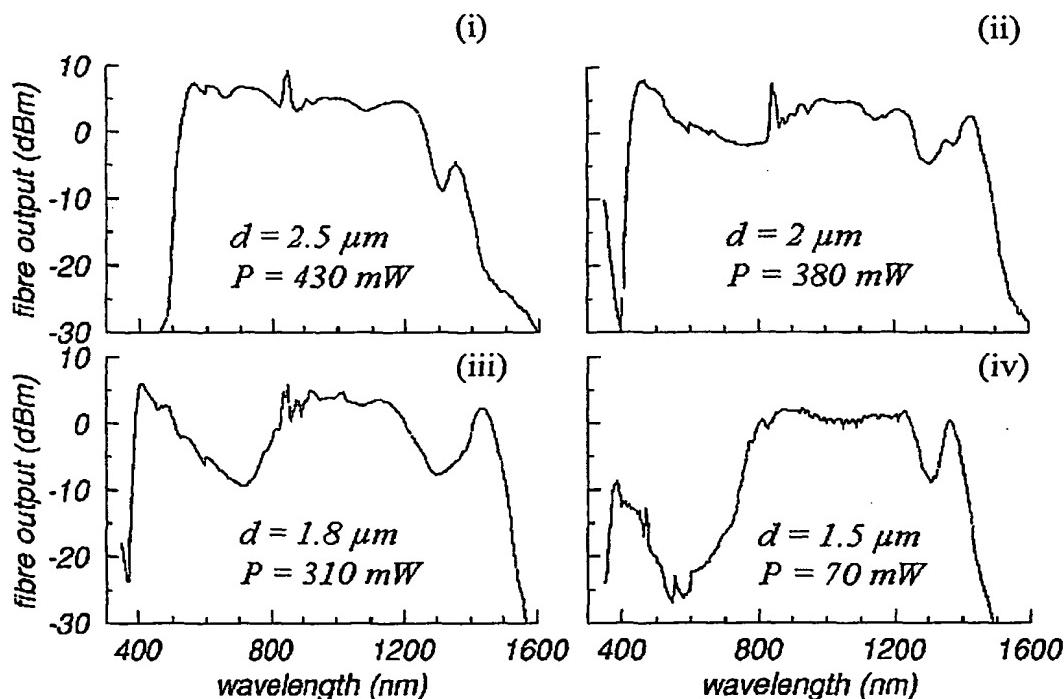


Fig. 6

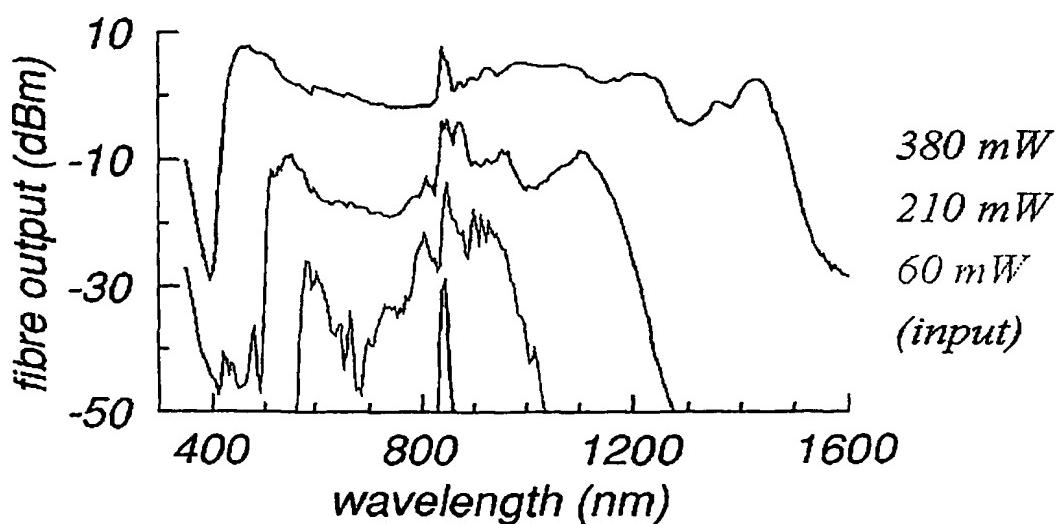


Fig. 7

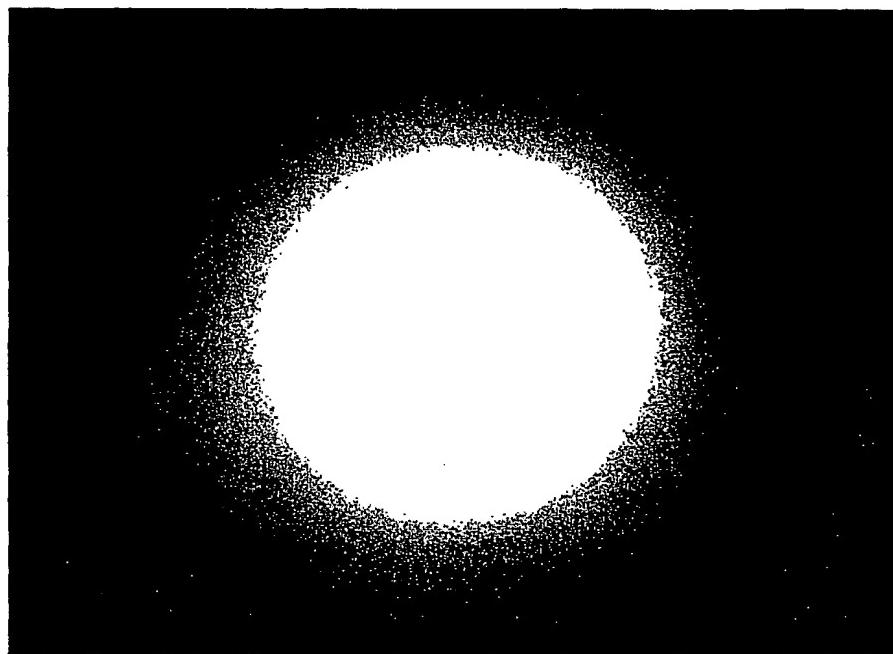
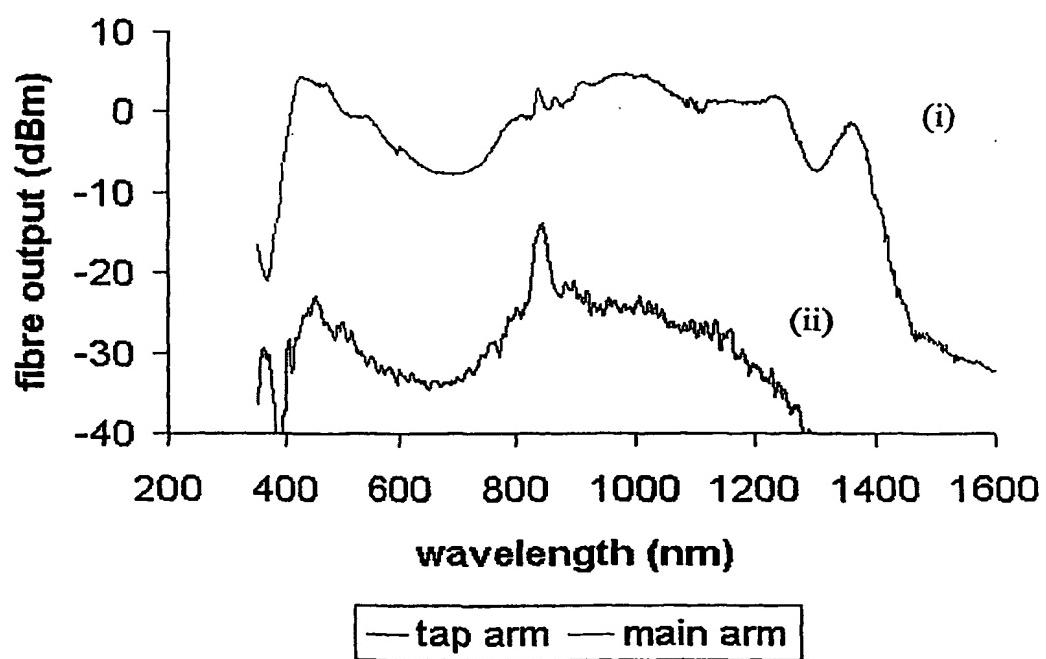


Fig. 8



BEST AVAILABLE COPY

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

1            International Application No  
PCT/GB 01/01947

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
**IPC 7    G02F1/365    G02F1/35**

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
**IPC 7    G02F**

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, COMPENDEX, PAJ

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 960 146 A (MORI KUNIHIKO ET AL) 28 September 1999 (1999-09-28) abstract figure 40; example 1 column 10, line 45 column 16, line 60 - line 63 column 22, line 12 - line 27; claim 4 — US 5 479 546 A (DUMAIS PATRICK ET AL) 26 December 1995 (1995-12-26) figure 4 column 4, line 7 - line 8 column 6, line 60 - line 61 — —/—	1-7, 9, 34-36
A		1, 8, 34-36

Further documents are listed in the continuation of box C.

Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the International filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

\*T\* later document published after the International filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

\*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

\*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

\*&\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the International search

30 July 2001

Date of mailing of the International search report

16/08/2001

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Gill, R

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Final Application No  
PCT/GB 01/01947

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>BOSKOVIC A ET AL: "Femtosecond figure of eight Yb:Er fibre laser incorporating a dispersion decreasing fibre"            ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB,            vol. 31, no. 17,            17 August 1995 (1995-08-17), pages            1446-1448, XP006003298            ISSN: 0013-5194            page 1447</p> <p>---</p>	1,8, 34-36
A	<p>BOGATYREV V A ET AL: "A single-mode fiber with chromatic dispersion varying along the length"            JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, MAY 1991,            USA,            vol. 9, no. 5, pages 561-566, XP002173478            ISSN: 0733-8724            abstract            page 562, paragraphs 1,4</p> <p>---</p>	1,8, 34-36
P,X	<p>BIRKS T A ET AL: "Supercontinuum generation in tapered fibers"            OPTICS LETTERS, 1 OCT. 2000, OPT. SOC.            AMERICA, USA,            vol. 25, no. 19, pages 1415-1417,            XP002173479            ISSN: 0146-9592            the whole document</p> <p>---</p>	1-38

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Information on patent family members

Final Application No

PCT/GB 01/01947

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)		Publication date
US 5960146 A	28-09-1999	JP	10090737 A	10-04-1998
US 5479546 A	26-12-1995	US	5710848 A	20-01-1998